



**UFBA**

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

**CÍCERO ALEXANDRE BRANDÃO DE PAULA**

**MONITORAMENTO E CONTROLE DO  
BALANCEAMENTO DE UNIDADE DE BOMBEIO  
MECÂNICO USANDO INVERSOR DE  
FREQUÊNCIA E FATOR DE CARGA CÍCLICA**

Salvador  
2012

**CÍCERO ALEXANDRE BRANDÃO DE PAULA**

**MONITORAMENTO E CONTROLE DO  
BALANCEAMENTO DE UNIDADE DE BOMBEIO  
MECÂNICO USANDO INVERSOR DE  
FREQUÊNCIA E FATOR DE CARGA CÍCLICA**

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

**Orientador:** Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson

**Co-Orientador:** Prof. Msc. Attilio Alberto Triggia

**Salvador  
2012**

---

P324 Paula, Cícero Alexandre Brandão

Monitoramento e controle do balanceamento de unidade de bombeio mecânico usando inversor de frequência e fator de carga cíclica / Cícero Alexandre Brandão de Paula. – Salvador, 2012.

123 f. : il. color.

Orientador: Prof. Doutor Herman Augusto Lepikson

Co-orientador: Atílio Alberto Triggia

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012.

1. Estações de bombeamento. 2. Inversores elétricos. 3. Engenharia de sistemas. II. Lepikson, Herman Augusto. III Triggia, Atílio Alberto. IV. Universidade Federal da Bahia. V. Título.

CDD.: 620.7

---

**CÍCERO ALEXANDRE BRANDÃO DE PAULA**

**MONITORAMENTO E CONTROLE DO  
BALANCEAMENTO DE UNIDADE DE BOMBEIO  
MECÂNICO USANDO INVERSOR DE  
FREQUÊNCIA E FATOR DE CARGA CÍCLICA**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

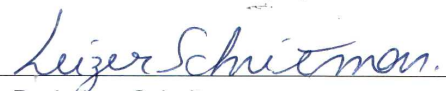
**Banca Examinadora**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora. (UFBA).

Salvador, 16 de maio de 2012

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson - Orientador  
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
Universidade Federal da Bahia - (UFBA).

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Amauri Oliveira  
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB)  
Universidade Federal da Bahia - (UFBA).

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leizer Schnitman  
Doutor em Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)  
Universidade Federal da Bahia - (UFBA).

  
\_\_\_\_\_  
Eng. Dr. Manuel de Almeida Barreto Filho  
Doutor em Engenharia de Petróleo pela University of Texas at Austin - USA  
Unidade Operacional de Exploração e Produção da Bahia- UO-BA (Petrobras)

A  
Tamara, filha querida, que a todo o momento me ensina novos caminhos para a  
aprendizagem.  
Eva e Antônio, pais queridos, que me preparam para enfrentar os desafios da vida com  
dignidade.  
Meus irmãos Silvania, Francisco, Cleber e Marielen.

# AGRADECIMENTOS

A Deus por me possibilitar a experiência de viver.

À Ivonete Silva pela paciência, dedicação e apoio.

À FAPESB, pela bolsa de mestrado concedida durante o curso.

Aos amigos e colegas do LEA, que apoiaram e acreditaram na construção de uma estrutura laboratorial audaciosa e tão necessária para alavancar a pesquisa na área de elevação artificial de petróleo dentro da Escola Politécnica da UFBA.

Ao amigo Lairton Lima, obrigado pelos excelentes anos de convivência e aprendizado.

Ao cordial amigo e co-orientador Prof. Msc. Atílio Triggia pelos ensinamentos sobre a Engenharia de petróleo e sobre ser humano. Sua assessoria técnica foi imprescindível para a realização deste trabalho.

Aos amigos Tiago de Oliveira, Danilo Costa, Pedro Castro e Cláudio Araújo obrigado por acreditar e apoiar a realização deste trabalho.

A meu orientador, Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson, pelo estímulo, ensinamento, coerência e destreza. Agradeço também por me apresentar o rigor acadêmico tão necessário no labor de um pesquisador.

Ao coordenador do programa de pós-graduação em Mecatrônica, Prof. Dr. Leizer Schnitman pelas inúmeras oportunidades de ensino e aprendizagem.

À equipe de profissionais do CTAI pelo apoio administrativo e pela amizade. Especialmente à Lúcia Lago, Ana Caroline, Andréa, Murilo, Flávio e Milena.

Aos professores e funcionários do Mestrado Acadêmico em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, pelo apoio à realização deste curso.

A todos que direta ou indiretamente me apoiaram para a realização deste trabalho.

No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.  
**Albert Einstein**

# RESUMO

O desbalanceamento é inerente ao funcionamento de uma unidade de bombeio (UB). Para reduzir seus efeitos, o contrabalanceio é uma das ações que precisa ser adotada. Para atingir o balanceamento ideal é preciso buscar o equilíbrio entre os torques requerido pela haste polida e o torque fornecido pelo redutor durante o ciclo de bombeio. O objetivo principal deste trabalho é utilizar informações extraídas de medições realizadas da tensão no barramento DC de inversores de frequência, visando, promover o balanceamento das forças que atuam nesse equipamento. O balanceamento ótimo de uma unidade de bombeio mecânico foi alcançado, medindo esta variável, determinando o fator de carga cíclica (CLF), promovendo o ajuste na posição dos contrapesos e manipulando a velocidade de bombeamento. Para isto, faz-se necessário conhecer os principais métodos utilizados para contrabalancear a UB. Também foi preciso determinar o CLF por meio da tensão do barramento DC. Além disso, um controlador de tensão elétrica foi projetado e implantado em um controlador (CLP), sendo seu propósito reduzir a variabilidade da tensão no barramento do inversor. Como resultados, se tem uma redução significativa na potência consumida, em função do rendimento energético do motor que foi elevado. A variação do torque foi reduzida drasticamente, contribuindo pra uma operação mais suave do sistema, o que certamente irá elevar o tempo médio entre falhas (MTBF). Estes resultados levaram a melhoria do rendimento energético e da confiabilidade do sistema.

**Palavras-chave:** Unidade de bombeio, balanceamento ideal, fator de carga cíclica, inversor de frequência, eficiência energética



# ABSTRACT

The unbalance is inherent to operation of a pumping unit (PU). To reduce its effects, contrabalanceio is an action that needs to be adopted. To achieve the ideal balance is necessary to seek a balance between the torques required by the polished rod and the torque provided by the gear during the pumping cycle. The main objective of this work is to use information extracted from measurements made in the DC bus voltage AC drive, aiming to promote the balance of forces acting on such equipment. Balancing an optimum mechanical pumping unit was achieved by measuring this variable, determining the cyclic load factor (CLF), promoting the adjustment of balances in the position and manipulating the pumping speed. For this, it is necessary to know the main methods used to counter the UB. It was also necessary to determine the CLF through the DC bus voltage. In addition, a voltage controller is designed and implemented in a controller (PLC), its purpose being to reduce the variability of the bus voltage of the inverter. As a result, has a significant reduction in power consumption, based on the energy efficiency of the engine was increased. The variation of the torque was reduced dramatically, contributing to smooth operation of the system, which will surely raise the mean time between failures (MTBF). These results have led to improvements in energy efficiency and system reliability.

**Keywords:** Pumping Unit, Ideal Balance, cyclic load factor, voltage controller, energy efficiency

# Lista de Figuras

Figura 2.1	Sistema de bombeio mecânico	26
Figura 2.2	Carta dinamométrica de superfície	29
Figura 2.3	Esquema simplificado - Geometria da UB	33
Figura 2.4	Sistema de potência do BM	38
Figura 3.1	UB do Laboratório de Elevação Artificial da UFBA	43
Figura 3.2	Esquema simplificado da unidade de bombeio	44
Figura 3.3	Decomposição de forças na unidade de bombeio	44
Figura 3.4	Esquema do desbalanceamento estrutural da UB	48
Figura 3.5	Esquema genérico de forças - BM	49
Figura 3.6	Dimensões da UB	50
Figura 3.7	Ângulos da UB	50
Figura 3.8	Carta dinamométrica	54
Figura 3.9	UB desbalanceada - Contrapesos na posição (0m)	55
Figura 3.10	Diagrama de blocos - Programa de balanceamento da UB	55
Figura 3.11	Interface para ajustes de parâmetros da UB	56
Figura 3.12	Contrapesos na posição ideal	56
Figura 3.13	Contrapesos em uma posição qualquer	57
Figura 4.1	Programa - Cálculo de torque de unidade de bombeio convencional.	61
Figura 4.2	Programa - Métodos para determinação de M	62
Figura 5.1	Esquema simplificado de um inversor de frequência	64
Figura 5.2	Diagrama em bloco - Inversor de frequência	65
Figura 5.3	Ponte inversora trifásica	66

Figura 5.4	Tensão de Saída - Forma de onda quadrada	68
Figura 5.5	Modelo da tensão VD	69
Figura 5.6	Circuito simplificado - Uma fase de um motor trifásico	70
Figura 5.7	Forma de onda no modo - Motor	71
Figura 5.8	Forma de onda no modo - Regeneração	72
Figura 5.9	Curva de torque de um motor de indução	73
Figura 6.1	Tensão no barramento DC e carga na haste polida <i>versus</i> deslocamento	77
Figura 6.2	Tensão no barramento DC com UB desbalanceada	78
Figura 6.3	Pontos da curva da tensão no barramento DC com uma UB desbalanceada	78
Figura 6.4	Coeficientes de Fourier no plano complexo	79
Figura 6.5	Espectro de potência do sinal <i>versus</i> frequência	79
Figura 6.6	Espectro de potência do sinal <i>versus</i> período	80
Figura 6.7	CLF e razão inverso da tensão instantânea / média do inverso da tensão <i>versus</i> deslocamento com uma UB desbalanceada	81
Figura 6.8	CLF <i>versus</i> deslocamento com uma UB balanceada	82
Figura 6.9	Diagrama em bloco do sistema a controlar	83
Figura 6.10	Diagrama de blocos para o controle VSD utilizando a tensão no barramento DC	84
Figura 6.11	Tensão no barramento DC, sem controle	86
Figura 6.12	Variação da tensão em torno da média no barramento DC, sem controle	87
Figura 6.13	Corrente na saída do inversor, sem controle	87
Figura 6.14	Variação da corrente em torno da média na saída do inversor, sem controle	88
Figura 6.15	Variação da tensão em torno da média no barramento DC com controle	89

Figura 6.16	Varição da corrente em torno da média na saída do inversor com controle .....	89
Figura 6.17	Corrente de torque com a UB desbalanceada .....	90
Figura 6.18	Corrente de torque com a UB balanceada .....	90
Figura 6.19	Esforço de controle - Variação da velocidade da UB .....	91
Figura 6.20	Varição da tensão no barramento DC e velocidade da UB .....	91
Figura A.1	Programa - Torques Líquidos .....	100
Figura B.1	Motor de indução trifásico idealizado .....	102
Figura B.2	Distribuição de forças em um motor idealizado .....	103
Figura B.3	Torque produzido pela interação de forças no entreferro e no rotor ...	105
Figura B.4	Circuito equivalente de uma fase de motor trifásico .....	106
Figura B.5	Curva de torque de um motor de indução .....	107
Figura C.1	NEMA - Classificação de motor de indução .....	109
Figura F.1	Programa do CLP - Página 1 de 5 .....	119
Figura F.2	Programa do CLP - Página 2 de 5 .....	120
Figura F.3	Programa do CLP - Página 3 de 5 .....	121
Figura F.4	Programa do CLP - Página 4 de 5 .....	122
Figura F.5	Programa do CLP - Página 5 de 5 .....	123

# Lista de Tabelas

Tabela 6.1	Parâmetros do controlador .....	88
Tabela 6.2	Comportamento da tensão no barramento DC .....	89
Tabela 6.3	Comportamento da corrente na saída do inversor .....	90

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>API</i>	American Petroleum Institute
<i>avg</i>	<i>Average</i>
<i>BM</i>	Bombeio Mecânico
<i>CBE</i>	Counterbalance Effect
<i>CLF</i>	Ciclic Load Factor
<i>CPM</i>	Ciclos por minuto
<i>ca</i>	Corrente alternada
<i>cc</i>	Corrente contínua
<i>D</i>	Posição ideal dos contrapesos
<i>DC</i>	Direct Current (Corrente continua)
<i>Eff</i>	Eficiência do motor
<i>Fac</i>	Força de aceleração
<i>Fe</i>	Força de empuxo
<i>Ff</i>	Força de fricção
<i>Fo</i>	Força (peso) do fluido
<i>Fp</i>	Força (carga) no pistão
<i>F</i>	Força na haste polida
<i>I</i>	Momento de inércia
<i>I<sub>C</sub></i>	Corrente no capacitor
<i>I<sub>RL</sub></i>	Corrente na carga
<i>I<sub>DC</sub></i>	Corrente no barramento DC
<i>IGBT</i>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<i>LEA</i>	Laboratório de Elevação Artificial
<i>M</i>	Momento
<i>MPRL</i>	Minimum Polished Rod Load
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Failures
<i>m</i>	Número de amostras
<i>N</i>	Frequência de rotação do equipamento

<i>NEMA</i>	National Electrical Manufacturers Association
<i>Ph</i>	Peso das hastes
<i>P<sub>f</sub></i>	Peso do fluido
<i>P<sub>mm</sub></i>	Potência mecânica média
<i>P<sub>mot</sub></i>	Potência do motor
<i>PRL</i>	Polished Rod Load
<i>PPRL</i>	Peak Polished Rod Load
<i>PR</i>	Deslocamento da haste polida
<i>Q<sub>RL</sub></i>	Carga no conjunto de hastes
<i>Q<sub>SU</sub></i>	Desbalanceamento estrutural
<i>RL</i>	Carga
<i>rms</i>	Root mead square
<i>S</i>	Curso da haste polida
<i>SPM</i>	Strokes por minuto
<i>SU</i>	Structural Unbalance
<i>T</i>	Período de um ciclo de bombeio
<i>TF</i>	Torque Factor
<i>t</i>	Tempo
<i>T<sub>r</sub></i>	Torque produzidos pelas cargas na haste polida
<i>T<sub>CB</sub></i>	Torque produzido pelos contrapesos
<i>T<sub>M</sub></i>	Torque médio
<i>T<sub>W</sub></i>	Torque máximo
<i>T<sub>net</sub></i>	Torque líquido
<i>UB</i>	Unidade de Bombeio
<i>US</i>	United States
<i>V</i>	Tensão
<i>V<sub>d</sub></i>	Tensão no barramento DC
<i>W</i>	Carga na haste polida (modelo)
<i>W<sub>r</sub></i>	Peso do recipiente
<i>W<sub>c</sub></i>	Peso da carga

# Lista de símbolos

- $\beta$  Ângulo formado entre a biela e viga da UB
- $\gamma$  Ângulo da biela de uma UB
- $\lambda$  Ângulo de uma viga de uma UB
- $\mu$  Média aritmética
- $\omega$  Velocidade angular
- $\phi$  Ângulo de defasagem entre tensão e corrente no bobinado
- $\sigma$  Desvio padrão
- $\theta_j$  Ângulo da manivela de uma UB



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Motivação e Proposta de Trabalho	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivos Específicos	22
1.3	Estrutura do Trabalho	22
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>24</b>
2.1	Bombeio Mecânico	25
2.1.1	Componentes do BM	26
2.1.2	Medição de Carga	27
2.1.3	Medição do Deslocamento do Conjunto de Hastes	28
2.1.4	Carta Dinamométrica	29
2.1.5	Balanceamento do BM	31
2.2	Contrabalanceamento da UB - Trabalhos Correlatos	32
2.3	Considerações Finais	41
<b>3</b>	<b>Modelo - Balanceamento do BM</b>	<b>42</b>
3.1	Unidades de Bombeio	43
3.1.1	Transmissão da Força da Haste Polida à Manivela	43
3.2	Cálculo do Efeito de Contrabalanceamento (CBE)	45
3.3	Desbalanceamento Estrutural da Unidade de Bombeio	47
3.4	Generalidades Sobre Contrapeso	48
3.5	Cinemática das Unidades de Bombeio	50

3.6	Cálculo de Torque Líquido no BM .....	51
3.6.1	Torque na Haste Polida .....	51
3.6.2	Torque Produzidos Pelos Contrapesos .....	52
3.6.3	Torque Líquido .....	53
3.7	Estudo de Caso .....	54
3.8	Considerações Finais .....	57
<b>4</b>	<b>Contrabalanceamento da Unidade de Bombeio .....</b>	<b>58</b>
4.1	Métodos - Cálculo de M - Momento Máximo de Contrabalanceamento .....	59
4.1.1	Método - Cálculo de M por CLF .....	60
4.1.2	Método - Cálculo de M por CBE e SU .....	60
4.1.3	Método - Cálculo de M por Torques Máximos .....	60
4.2	Estudo de Caso .....	61
<b>5</b>	<b>Obtenção do CLF via Inversor de frequência - Barramento DC .....</b>	<b>63</b>
5.1	Inversor de Frequência .....	63
5.1.1	Diagrama em Bloco de um Inversor .....	64
5.1.2	Ponte Inversora Trifásica .....	66
5.2	Variação da Tensão no Barramento DC .....	69
5.2.1	Máquina de Indução - Modo Motor e Regenerativo .....	71
5.3	Generalidades Sobre Curva de Torque de um Motor de Indução .....	72
5.4	Determinação do CLF - Barramento DC .....	73
<b>6</b>	<b>Balanceamento do BM com um Inversor de Frequência .....</b>	<b>76</b>
6.1	Generalidades de Sistemas Desbalanceados .....	76
6.2	Tensão no Barramento DC - Sistema Desbalanceado .....	77
6.3	CLF em Função da Tensão no Barramento DC .....	80
6.4	Análise do CLF em Função da Tensão no Barramento DC Após Balanceamento .....	81

6.5	Controle da Tensão do Barramento DC de um Inversor de Frequência que Aciona o Motor de um BM .....	82
6.6	Parâmetros do Controlador .....	84
6.6.1	Controle de Saturação .....	85
6.6.2	Definição da Tensão DC de Referência .....	85
6.7	Implementação no CLP .....	86
6.8	Síntese dos Resultados .....	88
<b>7</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>92</b>
7.1	Características e Vantagens do Sistema Desenvolvido .....	93
7.2	Sugestão para Trabalhos Futuros .....	94
	<b>Referências.....</b>	<b>96</b>
	<b>Apêndice A – Programa: Balanceamento da UB - Modelo de Craft .....</b>	<b>98</b>
A.1	Programa: Cálculo dos Torques .....	100
	<b>Apêndice B – Motor de Indução.....</b>	<b>101</b>
B.1	Campo Magnético Girante .....	101
B.2	Produção do Torque.....	104
B.3	Torque em Motores de Indução .....	105
B.3.1	Circuito Equivalente de um Motor .....	105
B.3.2	Curva de Velocidade <i>versus</i> Torque .....	106
	<b>Apêndice C – Classificação de Motor de Indução - NEMA.....</b>	<b>109</b>
	<b>Apêndice D – Programa - Torques .....</b>	<b>110</b>
	<b>Apêndice E – Programa: Análise Espectral da Tensão no Barramento DC .....</b>	<b>116</b>
	<b>Apêndice F – Programa do CLP.....</b>	<b>119</b>

# 1 Introdução

A demanda mundial pela elevação da eficiência energética tem estimulado o desenvolvimento de novos métodos e tecnologias, em praticamente todas as áreas da engenharia. Por outro lado, o barateamento dos sistemas mecatrônicos têm ensejado novas oportunidades para introdução de abordagens inovadoras que melhoram muito a eficiência e a segurança dos equipamentos e processos. Um caso particular interessante a observar são os estudos que viabilizam a redução da vibração dos equipamentos. O desbalanceamento é uma importante causa da vibração mecânica. Porém, este fenômeno pode ser reduzido com a minimização do fator de carga cíclica do motor elétrico que aciona o sistema. Com esta redução tem-se o aumento da eficiência energética dos processos produtivos. Os poços produtores de petróleo equipados com bombeio mecânico (BM) são exemplos de sistemas que oferecem oportunidades de ganhos com a redução do desbalanceamento.

O BM é o método de elevação artificial mais utilizado em campos terrestres no mundo. O desenvolvimento dos componentes mecânicos do método se encontra bem consolidado. Este método se adapta as diversas condições de operação e composição de fluidos. Porém, no que se refere ao rendimento existe potencial de melhoria, principalmente no que diz respeito ao rendimento energético.

O desbalanceamento é inerente ao funcionamento das unidades de bombeio. O comportamento dinâmico das diferentes forças que atuam neste sistema dificulta a obtenção de um método para balanceamento com alta precisão, de modo que se conduza ao balanceamento ideal do mesmo. Analisando o ciclo de bombeio verifica-se uma grande variação na carga devido às forças que nele atuam, forças tais como, peso próprio das hastes, empuxo proveniente do fluido, aceleração da coluna de hastes, atrito, que se opõe ao movimento da coluna de hastes, e, por fim, o peso do fluido. A variação anormal da carga na haste polida, e conseqüentemente do torque desenvolvido pelo redutor, é extremamente prejudicial ao funcionamento da unidade de bombeio, reduzindo a vida útil dos seus componentes e aumentando o consumo de energia. Daí vem a importância de se tentar reduzir o efeito produzido pela variação anormal da carga no conjunto de hastes do BM.

Para reduzir a variação do torque que atua no sistema, geralmente contrapesos são colocados na manivela ou no balancim do BM. Portanto, é preciso determinar o valor dos contrapesos e, do efeito provocado por esses, o que depende de se conhecer bem as características do sistema de bombeio mecânico. Porém, mesmo tendo acesso a estes dados, o resultado em geral é obtido com valores aproximados, devido principalmente às forças inerciais que atuam na unidade de bombeio (UB), o que sempre leva a soluções aquém das desejáveis.

Há, portanto, um bom potencial para realização de estudos sobre desbalanceamento visando melhorar o desempenho mecânico e energético, bem como a confiabilidade dos equipamentos e respectivos componentes. Vários estudos foram desenvolvidos ao longo das últimas cinco décadas, com resultados promissores. No entanto, a complexidade dos métodos propostos, aliada a fatores como exigência de bom conhecimento da geometria da unidade de bombeio (UB), uso da carta dinamométrica de superfície e medição de diversas grandezas, como a potência instantânea, torque líquido e velocidade, tem restringido a aplicação desses métodos a situações muito específicas, onde grandes investimentos se justificam e quando há disponibilidade de profundo conhecimento especialista em elevação artificial de petróleo e bancos de dados atualizados. Devido a estes fatores, os benefícios que se teria ao balancear a unidade de bombeio, muitas vezes, não são devidamente explorados.

## **1.1 Motivação e Proposta de Trabalho**

Para o balanceamento de unidades de bombeio pelos métodos tradicionais, em geral, faz-se necessário o uso da carta dinamométrica de superfície visando obter o torque ou inferir a potência exigida do motor. Dado o histórico de uso da carta dinamométrica superfície, esta importante ferramenta no apoio ao diagnóstico do sistema, admite-se que ela guarda informações, que facilitam identificar as causas dos problemas. Porém, somente com uso da carta é impossível determinar o efeito de contrabalanceamento sem conhecer a geometria da UB, desbalanceamento estrutural da mesma e análise de especialista em elevação artificial. Devido a fatores como os citados, muitas vezes aplicar os métodos existentes fica limitado à fase de projeto, o que dificulta obter benefícios com o balanceamento após algum tempo de operação do poço. Isto, pois, com o passar do tempo, as condições de operação se alteram, sendo necessário ajustar manualmente a posição dos contrapesos sempre que necessário. Os métodos baseados nas cartas dinamométricas de superfície aplicados para balancear a UB em geral não consideram as forças inerciais

do sistema, e este é um dos fatores que reduzem a precisão desses métodos. Por outro lado, graças a tendência crescente uso de inversores de frequência nos acionamentos do BM, e à possibilidade de se inferir o torque mecânico por meio de medição de corrente elétrica, a determinação do fator de carga cíclica e a minimização do seu valor após o ajuste das posições dos contra pesos, apresenta-se como alternativa promissora para monitorar o comportamento do sistema e promover o controle por meios não manuais ou mecânicos. Esta abordagem traz também a vantagem de não ser necessário conhecimento prévio das características do sistema de bombeio mecânico em questão, sendo necessário apenas inferir o torque por meio da corrente elétrica e ajustar a posição dos contrapesos visando atingir o mínimo global da função fator de carga cíclica (conhecido como CLF - Cyclic Load Factor), durante o ciclo de bombeamento.

Esta abordagem, baseada na minimização do CLF, ao ser comparado aos métodos baseados na carta dinamométrica, enseja viabilizar o balanceamento da UB automaticamente, tendo como base a medição da corrente elétrica do motor, via algoritmos de controle. Este método também se mostra melhor adaptado à realidade atual, onde a medição da corrente do motor da unidade de bombeio se tornou algo trivial na rotina operacional do sistema. Porém, quando se atenta para mudança nas condições de operação, por ser uma medida de fluxo, podem ocorrer alterações instantâneas significativas, e isto faz com que o CLF obtido por meio da corrente se altere podendo dificultar o balanceamento por meio dela. Além disso, também é necessário medir o deslocamento do conjunto de hastes. No entanto, estudos preliminares mostraram que a tensão do barramento DC de um inversor de frequência, que alimenta um motor de uma UB, também pode ser utilizada para obter o CLF, sem sofrer as influências dos fenômenos de fluxo e dispensando o uso de sensor externo para medição de posição. Portanto, uma vez comprovada a hipótese de que seria possível utilizar da informação extraída de dados lidos do banco de capacitores (barramento DC) de um inversor de frequência para obter o CLF, e, controlar o torque líquido requerido por uma UB, ter-se-á disposição um sistema eficaz para contrabalanceamento da unidade de bombeio.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um método para balancear uma UB a partir de um valor mínimo do CLF para controlar o torque líquido requerido pelo BM. Para isto será utilizado os valores de tensão medidos do barramento DC de um inversor de frequência que alimenta o motor de uma UB.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Diante do perfil investigativo da proposta deste trabalho, propõe-se:

- Desenvolver um modelo matemático para determinar o valor do CLF do BM, por meio da tensão medida em um barramento DC de um inversor de frequência;
- Projetar um controlador para apoiar o balanceamento ideal da UB, manipulando para isto a frequência de acionamento do motor, tendo como variável de processo a tensão DC do barramento de um inversor de frequência, e;
- Validar o modelo do CLF e o controlador desenvolvido para apoiar o balanceamento ideal de uma unidade de bombeio.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Essencialmente, no capítulo dois, o Bombeio Mecânico é apresentado e são discutidos alguns métodos utilizados para promover o balanceamento de uma UB. Nesse capítulo também, se tem a correlação entre os métodos existentes e o objetivo principal do trabalho. No capítulo três, os modelos que representam o comportamento da unidade de bombeio são apresentados, com ênfase no seu comportamento dinâmico. O torque é obtido em função da força na haste polida e da velocidade angular visando compreender o balanceamento de cargas na UB. O sistema é detalhado com o propósito de apresentar o processo de transferência de força da haste polida para a manivela. Também são apresentadas as relações trigonométricas que representam a geometria de uma unidade de bombeio. O cálculo do contrabalanceio é descrito. O desbalanceamento estrutural da UB também é apresentado. Por fim, a cinemática da UB é descrita. No capítulo quatro se faz um paralelo entre os principais métodos utilizados para contrabalanceamento do BM, quando o método baseado no CLF é comparado com os métodos mais utilizados na indústria de Petróleo para este fim. Para realizar o estudo foi utilizado um programa desenvolvido por Triggia (2010), que permitiu identificar as vantagens e limitações de cada método. No capítulo cinco tem-se a identificação da condição de desbalanceamento da UB por meio do CLF, onde se encontra descrito o modelo que representa a condição de desbalanceamento utilizando os valores de tensão medidos em um barramento DC de um inversor de frequência. A proposta nesta fase foi estudar o comportamento desta variável, visando identificar um modelo matemático que permita correlacioná-lo ao CLF, possibilitando identificar condições de desbalanceamento do BM. No capítulo seis propõe-se a determinação

do balanceamento da unidade de bombeio por meio do CLF. Os dados que representam a tensão do barramento DC são analisados utilizando a transformada de Fourier, com o propósito de analisar o espectro e identificar a condição de desbalanceamento. Com a UB operando sob as condições de desbalanceamento e balanceado, tem-se os gráficos que representam os CLF e espectro de energia, por meio destes as condições são analisadas e comparadas. Os resultados das análises são apresentados e discutidos. Ainda no capítulo seis se propõe a obtenção do balanceamento ideal utilizando um controlador, que tem o propósito de manipular a frequência de acionamento do motor da UB, ou seja, manipulando sua velocidade, visando controlar o torque líquido do sistema. Após a implantação e sintonia do controlador em um sistema real, os resultados são apresentados, analisados e discutidos. Finalmente, faz-se um estudo comparativo sobre a eficiência energética em um sistema de bombeio mecânico, levando em consideração unidade balanceada e desbalanceada. Completando o trabalho com o capítulo sete onde são relatadas as conclusões acerca do sistema desenvolvido, quando é verificado se os objetivos foram estabelecidos, além disso, trabalhos futuros são sugeridos.



## 2 Revisão bibliográfica

Os métodos de elevação artificial são necessários sempre que a pressão na zona produtora do reservatório de um poço de petróleo não é suficiente para realizar a elevação do fluido naturalmente, estando estes presentes na maioria dos poços. De acordo com Ordoñez (2008) , em grande parte dos poços de produção, no início da vida produtiva do poço a pressão do reservatório é suficientemente elevada para emergir os fluidos lá presentes, e, portanto, são denominados como poços surgentes (do termo inglês, *flowing well*). Contudo, dado que exista uma produção contínua ao longo dos anos, a pressão do reservatório decresce, impossibilitando a elevação natural do fluido devido às perdas de pressão no caminho de elevação. Neste momento da vida útil do poço faz-se necessário a utilização de algum método de elevação artificial, que fornecerá energia na forma de diferencial de pressão ao fluido para sua elevação, (TAKÁCS, 2003; FILHO, 1993).

De acordo com Quintaes (2010) , historicamente, o primeiro método de elevação artificial foi o bombeio mecânico (do termo inglês, *Sucker – rod Pumping*), surgido logo após o nascimento da indústria do petróleo. Sua importância se reflete no número de instalações existentes, que correspondem a 80% dos poços produtores mundiais, o que lhe dá a posição de método mais utilizado no mundo. No Brasil, responde por cerca de 8% da produção diária de petróleo, mas equipa em torno de 80% dos poços produtores.

Segundo Fuyu e Guoming (2010) o BM é o principal método de elevação artificial da indústria mundial de petróleo, logo, exerce papel decisivo na garantia do alto desempenho dos campos produtores. Atualmente 90% dos poços produtores de petróleo instalados estão em terra, sendo 80% da produção de petróleo por elevação artificial produzido por bombeio mecânico.

As características construtivas desse sistema de bombeio proporcionam-lhe vantagens em relação aos outros métodos de elevação artificial de petróleo. Dentre estas vantagens se destacam a facilidade de projetar, operar e manter o sistema funcionando. Além disso, ao manter as condições de operação normais a sua vida útil é prolongada, atendendo a toda vida produtiva do poço. Com isto, tem-se como grande vantagem menor custo ver-

sus produção durante toda vida útil. Para garantir que este sistema opere em condições normais de funcionamento, os componentes que estruturam o BM precisam seguir uma filosofia de manutenção baseado na prevenção e na verificação da condição de funcionamento, dentre as atividades de manutenção previstas tem-se o balanceamento da unidade de bombeio.

O balanceamento da UB trata-se da utilização de algum método para promover o ajuste da posição dos contrapesos na UB, visando produzir um efeito que traduza em balanço entre os torque requerido pela haste polida e do torque produzido pelo motor. De acordo com Quintaes (2010) , para realizar este procedimento, uma equipe técnica é deslocada para o campo. O resultado depende do método e da pericia dos técnicos. O método mais comum utilizado para promover o balanceamento, baseia-se na medição dos picos de correntes. Este método consiste em tentar obter valores iguais de corrente elétrica máxima do motor, durante os cursos ascendentes e descendentes. Para isto, faz-se necessário medir a corrente e promover o ajuste na posição dos contrapesos. Trata-se de minimizar o fator de carga cíclica (CLF) empiricamente. No entanto, devido aos riscos envolvidos nesta operação, o procedimento tem forte rejeição. Ou seja, medir a corrente do motor da UB *in loco* e promover o ajuste na posição dos contrapesos, repetidas vezes, é considerado arriscado. Porque, entre um ajuste e uma medição, pode ocorrer um erro. E, o sistema pode ser colocado no modo automático. Isto levaria o equipamento a partir a qualquer momento. Se nesse momento, o pessoal da manutenção estiver ajustando a posição dos contrapesos manualmente, poderia se ter um acidente.

O BM, ao operar sob condições balanceadas tem seu consumo de energia minimizado e a vida útil dos seus componentes prolongada, (LIU et al., 2010).

Essencialmente, o que se pretende neste capítulo é conhecer os métodos mais utilizados para balancear a unidade bombeio, em especial, os que utilizam grandezas elétricas.

## 2.1 Bombeio Mecânico

O BM é constituído basicamente de componentes, que se encontram instalados na superfície e fundo de um poço, cujos elementos se encontram ilustrados na figura 2.1.

O Princípio de funcionamento do BM - em geral, a unidade de bombeio (UB) basicamente converte a energia elétrica em mecânica. Ou seja, o movimento rotativo do eixo de um motor elétrico é convertido em movimento de subida e de descida de uma viga metálica apoiada em um mancal, denominado balancim. Acoplado a esse por meio de um cabresto

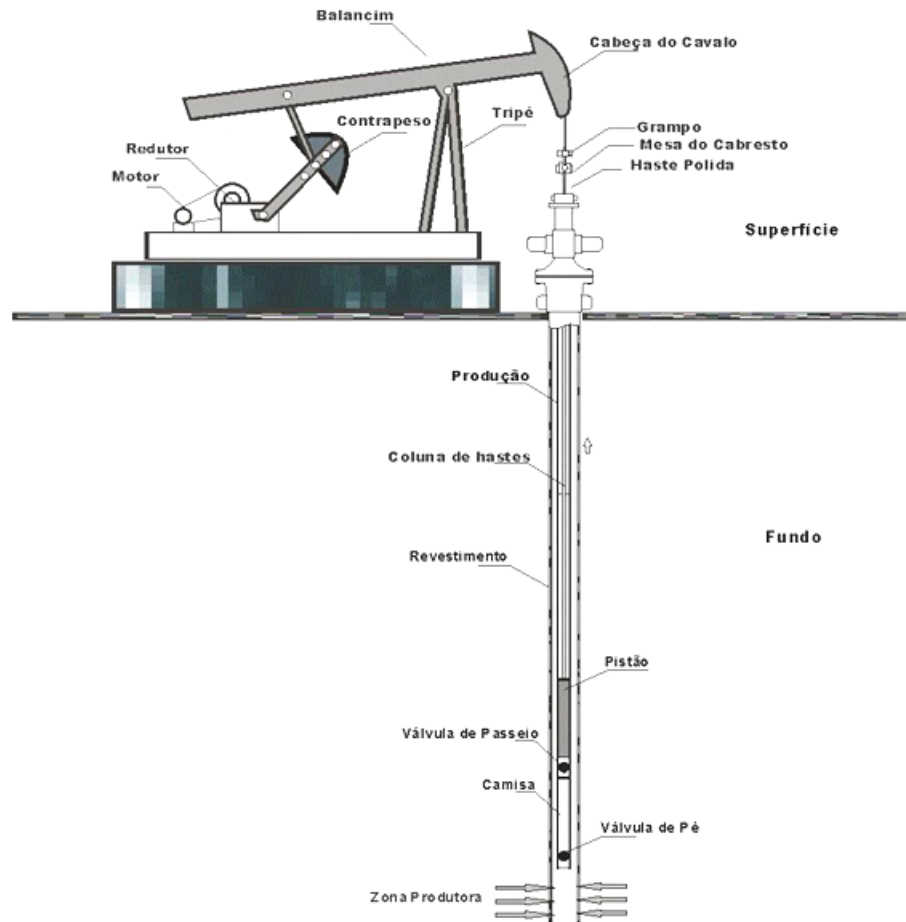


Figura 2.1: Sistema de bombeio mecânico

se tem um conjunto de hastes, que transfere movimento da superfície ao fundo do poço. Junto ao fundo do poço, tem-se uma bomba que converte a energia mecânica provinda do conjunto de hastes, em energia hidráulica. Por meio desta energia se tem a elevação do fluido à superfície.

### 2.1.1 Componentes do BM

Aqui se apresenta detalhadamente a função de cada componente. O sistema é dividido em componentes de superfície e componentes de fundo. A figura 2.1 ilustra as principais partes do sistema. Na estrutura de superfície tem-se uma unidade de bombeio, composta por: motor, redutor, contrapesos, balancim, tripé, cabeça do cavalo, mesa do cabresto (TAKÁCS, 2003).

Os elementos de fundo são: revestimento; coluna de produção; coluna de hastes e bomba de fundo, composta por camisa, pistão e válvulas de pé e passeio.

A unidade de bombeio é o elemento que converte o movimento rotativo do eixo do motor em movimento alternativo da coluna de hastes. A coluna de hastes é o elemento de ligação entre a unidade de bombeio e a bomba de fundo. A bomba de fundo é um tipo de bomba alternativa, de deslocamento positivo de simples efeito, ou seja, desloca o fluido apenas em um sentido do movimento alternativo. A função da bomba de fundo é fornecer energia ao fluido vindo da formação, elevando-o para a superfície. A transmissão de energia ao fluido ocorre sob a forma de aumento de pressão,(THOMAS et al., 2001).

O torque exigido do motor para realizar a elevação do fluido em um sistema de bombeio mecânico muda em função da potência requerida pela haste polida durante o ciclo de bombeio. O comportamento do torque muda durante os cursos, ascendente e descendente. A variação na intensidade do torque está associada ao desequilíbrio entre às forças que atuam no sistema durante esses cursos.

O desequilíbrio entre estas forças ocorre devido à má distribuição de forças no sistema, provocando vibrações pontuais, que aparecem bem definidas no espectro de vibrações. Para reduzir os impactos negativos gerados pelo desbalanceamento em um BM, durante a fase de projeto define-se a massa de um conjunto de contrapesos que é instalado na manivela, para unidades de bombeio convencionais. Quando os contrapesos são dimensionados e posicionados corretamente, tem-se um efeito durante o funcionamento da UB, que pode reduzir e até anular o desbalanceamento, pontual, durante o ciclo de bombeio.

De acordo com Liu "e outros"(2010) , o torque instantâneo pode ser determinado usando dados de carga e posição dos contrapeso e o momento de contrabalanceio. Diante disso, faz-se necessário conhecer as equações matemáticas que representam as forças e o deslocamento que atuam no sistema. A próxima seção se encarregará de apresentá-las

### 2.1.2 Medição de Carga

A carga e o deslocamento são as principais grandezas utilizadas para identificar problemas durante o ciclo de bombeamento do BM.

O valor da carga é geralmente medido na superfície, junto à haste polida. O valor da carga no fundo pode ser inferido utilizando modelos matemáticos e obtendo soluções por meio de algoritmos para as equações de ondas propostas nos modelos. A primeira haste recebe o nome de haste polida, porque esta trabalha em conjunto com uma caixa de vedação (do termo inglês,*stuffing box*),e é polida para assegurar menor atrito na cabeça do poço. A haste polida está sujeita à maior força de tração em toda a coluna, pois esta

sustenta as seguintes cargas, (THOMAS et al., 2001):

- Peso das hastes ( $Ph$ ) ↓ : é o peso próprio da coluna de hastes medido no ar;
- Força de empuxo ( $Fe$ ) ↑: esta força é igual ao peso do fluido deslocado pela coluna de hastes;
- Força de aceleração ( $Fac$ ) ↑↓: é a força responsável pela variação da velocidade das hastes em movimento;
- Força de fricção ( $Ff$ ) ↑↓: atua no sentido oposto ao do movimento e, é devida ao atrito das hastes com o fluido e com a coluna de produção;
- Peso do fluido ( $Pf$ ) ↓: é o peso da coluna de fluido que está acima do pistão.

A carga ( $F$ ), dada em  $N$ , pode ser medida por um transdutor de força (tipo compressão/tração) instalado na haste polida. Este sensor mede a soma vetorial das forças que atuam nela, trata-se da soma algébrica de todos os vetores que representam as cargas supracitadas, como mostra a equação 2.1:

$$F = Ph + Fe + Fac + Ff + Pf \quad (2.1)$$

Na saída do pistão, junto à bomba de fundo, a carga ( $F_{pistao}$ ) pode ser obtida por meio da força exercida pelo pistão, correlacionando o módulo da diferença de pressão, entre a pressão na admissão e na descarga da bomba e multiplicando pelo módulo da área do pistão.

### 2.1.3 Medição do Deslocamento do Conjunto de Hastes

A medição da posição da haste polida, em um sistema de bombeio mecânico, serve para informar como ocorre o deslocamento da coluna de hastes. Por meio desta grandeza é possível inferir a posição do pistão da bomba de fundo. Este deslocamento pode ser medido através de um transdutor de posição acoplado diretamente na haste polida ou por meio de um sensor discreto para detecção do ponto zero da manivela, neste caso, o movimento é considerado harmônico, e pode ser definido por meio da equação 2.2, ela traduz com boa aproximação o deslocamento da coluna de haste (TORRES et al., 2010).

$$PR = \frac{S}{2}[1 - \cos(\omega t)] \quad (2.2)$$

Onde:

$PR$  - Deslocamento da haste polida, em (m);

$S$  - Curso da haste polida, em (m);

$w = \frac{2\pi}{T}$  - Velocidade angular, em (rad/s);

$t$  - Tempo, em (s).

### 2.1.4 Carta Dinamométrica

Um método para determinar o desempenho do bombeio mecânico foi proposto por Snyder e Bossert (1963), eles fizeram isto medindo a força e o deslocamento na superfície. Após interpolar os dados obtiveram um registro gráfico contínuo da força resultante que atua na haste polida versus o deslocamento da mesma a este gráfico deu-se o nome de carta dinamométrica. Esta carta registra as cargas que atuam no sistema durante os cursos ascendente e descendente. Confrontando a carta gerada com cartas padrões pode-se analisar o comportamento dos equipamentos instalados na superfície e no fundo do poço, além disso é possível analisar as condições de fluxo do reservatório.

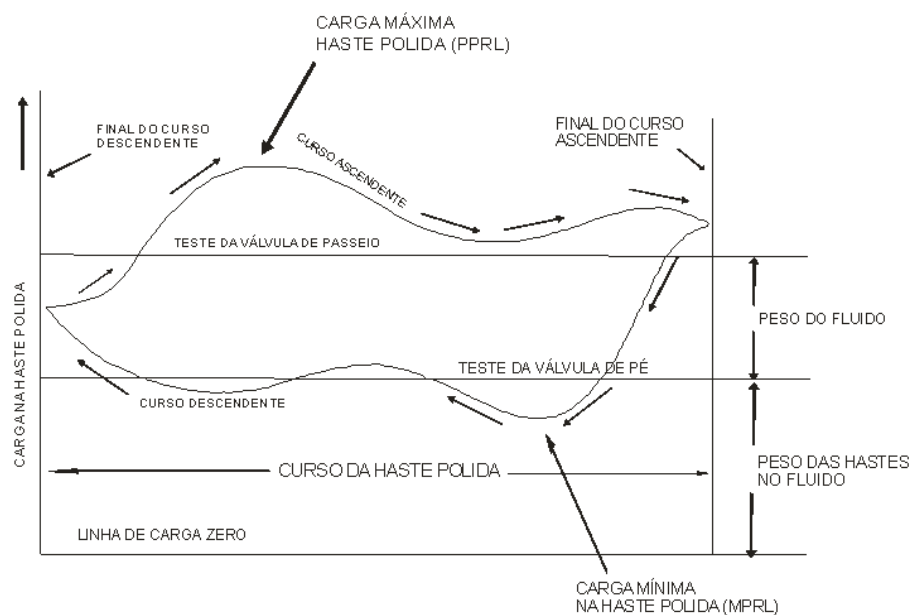


Figura 2.2: Carta dinamométrica de superfície (THOMAS et al., 2001, p.253)

Um método para gerar a carta dinamométrica de fundo foi desenvolvido por (GIBBS, 1967). Desde então, a solução proposta por ele também foi adotada como padrão em âmbitos mundiais. Esta solução foi protegida por meio da patente U.S. 3.343.409.1967.

O trabalho desenvolvido por Filho (1993) complementa o de Gibbs. Onde no modelo

para a geração da carta de fundo foi acrescido o amortecimento existente no movimento da coluna de hastes, devido à interação entre o fluido e as hastes. Filho caracterizou de forma mais realista a influência do atrito durante os cursos ascendentes e descendentes do BM. Ele considera em seu modelo o cálculo de maior força de tração durante o curso ascendente, porque o fluido e a coluna de hastes se movimentam no mesmo sentido. E durante o curso descendente, que as forças de compressão são menores, pois fluido e coluna se movimentam em sentido contrários.

Se encontra ilustrada na figura 2.2, uma carta dinamométrica de superfície típica, onde, o gráfico representa basicamente a carga versus o deslocamento da haste polida. A carga máxima (PPRL) ocorre durante o curso ascendente e, a mínima (MPRL) no curso descendente. Além disso, tem-se o peso do fluido que é elevado durante o curso ascendente. A variação da carga (PRL) durante os cursos ascendentes e descendentes é resultado do desbalanceamento das forças que atuam no sistema.

Por meio das cartas dinamométricas de fundo é possível se conhecer o comportamento do BM:

1) Conhecer o desempenho da unidade de bombeio:

- obter o torque do redutor;
- calcular a potência requerida na haste polida;
- calcular a eficiência da unidade de bombeio, e;
- para dimensionar estruturas mecânicas em função da carga;

2) Conhecer o desempenho da coluna de hastes:

- para obter as cargas máxima, mínima e a faixa de carga do conjunto de hastes, e;
- conhecer as cargas máxima, mínima e a faixa de carga a um determinado comprimento do conjunto de hastes.

3) Conhecer o desempenho dos equipamentos instalados no fundo do poço, incluindo:

- o desempenho das válvulas de pé e passeio na bomba de fundo;
- o gradiente de pressão no tubo de produção, e;
- identificar a pressão líquida na entrada da bomba.

A carta dinamométrica de fundo é a principal ferramenta disponível para avaliar as condições em que está ocorrendo o bombeamento, dado o histórico de utilização dessa carta gráfica para o controle e detecção de falhas do sistema. Existe na literatura padrões de cartas de fundo associados a características e problemas operacionais que ocorrem durante o bombeamento, facilitando diagnósticos como pancada de fluido, vazamento nas válvulas de passeio ou pé, pistão preso, desbalanceamento da UB, dentre outros. Porém, quando ocorre a superposição destes efeitos, a classificação e, avaliação da carta fundo é bastante dificultada, prejudicando o monitoramento do sistema, (ORDOÑEZ, 2008).

Portanto, não há como negar a importância histórica do uso da carta dinamométrica na análise do comportamento do BM. No entanto, usar a carta obtida de maneira convencional implica no uso de dois sistemas de medição, cujos mensurados são: o deslocamento e a carga. Sabe-se que instalar, aferir e manter estes sistemas é dispendioso.

### 2.1.5 Balanceamento do BM

Segundo McCoy "e colaboradores"(1997) , o balanceamento de uma unidade de bombeamento (UB) requer que o torque no redutor seja determinado em função da posição da haste polida durante um curso completo. Três métodos práticos foram desenvolvidos:

- Medir a carga *versus* posição na haste (carta dinamométrica), em seguida medir o efeito de contrabalanço na haste, e, então, calcular o torque do redutor a partir do conhecimento da geometria da unidade.
- Medir a carga e a posição da haste polida, medir também a posição do contrapesos na manivela. Em seguida, deve-se calcular o torque do redutor e apresentar as novas posições para os contrapesos para um balanceamento adequado da unidade de bombeamento utilizando a geometria da UB.
- Medir a energia usada pelo motor principal e converter a potência em torque.

O conceito de contrabalanceamento ideal já foi amplamente discutido na literatura e, normalmente, dois são os critérios que vêm sendo mais adotados para representá-lo:

- Igual torque máximo em ambos os cursos, ascendente e descendente, e;
- Igual potência requerida em ambos os cursos, ascendente e descendente.



Um terceiro critério foi introduzido por Takács (2003), que é o de minimizar o Fator de Carga Cíclica - CLF (do termo inglês, *Cyclic Load Factor*), parâmetro calculado a partir dos valores de torque a que está sendo submetido o redutor da UB, durante um ciclo de bombeio (cursos: ascendente e descendente).

Por definição, a potência do motor é diretamente proporcional ao CLF. Esta é a principal relação que se explora neste trabalho. Então, quanto menor for CLF, menor será a potência requerida. Por consequência, tem-se a redução no consumo de potência requerida e o aumento do tempo médio entre falhas - MTBF (do termo inglês, *Mean Time Between Failures*). Porém, este ganho só poderá ser verificado após a utilização do sistema desenvolvido em campo.

No entanto, a obtenção do CLF conforme proposto por Takács apresenta aspectos que podem ser melhorados. Uma das limitações do método refere-se à medição do torque, que nem sempre está disponível. Além de ser necessário medir o deslocamento da haste polida.

Diante deste contexto, obter o CLF por meio de outra variável que não fosse o torque e, dispensasse o uso da medição do deslocamento, simplificaria o uso do método proposto por Takács. Ao final deste trabalho pretende-se obter o CLF por meio da tensão medida num barramento DC de inversores de frequência, que alimentam motores de unidades de bombeio, instaladas em poços petrolíferos equipados com BM. Além disso, manipular a velocidade desta unidade com o propósito de obter o balanceamento ideal do sistema.

Para melhor compreender o balanceamento do BM faz necessário entender como é possível contrabalancear a Unidade de Bombeio, que equipa o sistema. Alguns dos métodos usados para promover o balanceamento de unidades de bombeio utilizam dados tais como, potência, torque e deslocamento extraídos da carta dinamométrica. Os principais métodos encontrados na literatura serão analisados e discutidos na próxima seção deste capítulo.

## 2.2 Contrabalanceamento da UB - Trabalhos Correlatos

Embora nenhum método para balanceamento do sistema de bombeio mecânico tenha sido aceito sem restrições, é fato que cada um gerou contribuições importantes no entendimento e solução para o problema de desbalanceamento das unidades de bombeio.

Devido à importância prática e econômica do contrabalanceamento ideal, este é um

tema discutido há vários anos, trabalhos tais como Kemler (1943) e Takács (2003) , relatam este interesse. Em Gipson (1984) , algumas abordagens foram apresentadas, com o propósito de encontrar o momento ideal de contrabalanceamento, satisfazendo um dos seguintes critérios:

- correntes de picos iguais, durante os cursos ascendentes e descendentes.
- torque líquido máximo nos cursos acedentes e descendentes iguais;
- potência requerida nos cursos ascendentes e descendentes é igual;
- um mínimo fator de carga cíclica mecânica alcançada.

Os modelos com as suas respectivas contribuições foram registrados por meio de publicações, e são apresentados e discutidas no decorrer deste texto.

Sob esta perspectiva, observa-se, desde a década de 1960, trabalhos sendo realizados no intuito de minimizar os efeitos do desbalanceamento no consumo de energia e no desgaste dos componentes mecânicos do sistema do BM. Neste sentido, alguns métodos foram desenvolvidos visando promover o balanceamento da UB. As vantagens e limitações de alguns destes métodos serão apresentadas a seguir.

Para facilitar a compreensão de alguns dos métodos utilizados para balanceamento de unidade de bombeio é preciso conhecer as cargas na haste polida, momento produzido pelos contrapesos, desbalanceamento estrutural da UB, determinar o curso e os ângulos formados entre as partes móveis da UB. A figura 2.3 apresenta um esquema simplificado da UB com o propósito de facilitar a compreensão de sua geometria.

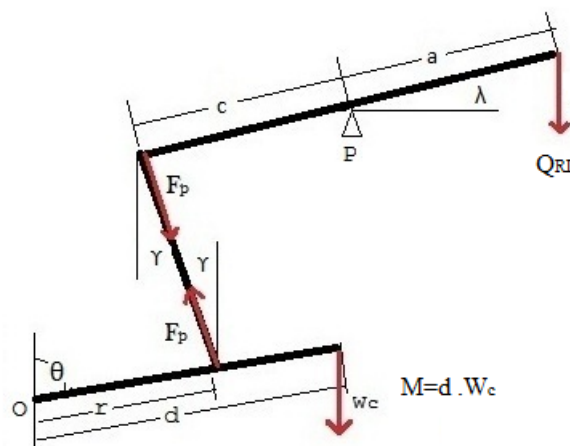


Figura 2.3: Esquema simplificado - Geometria da UB

Dentre os métodos, dois são mais conhecidos, estes visam inferir o torque no redutor de uma UB, utilizando a carta dinamométrica, sendo um método denominado fator de torque API e uma técnica baseada no torque líquido, que é baseada na faixa de medição da carga e do curso da haste polida.

O método de cálculo de torque sugerido pelo API, e utilizado até hoje com pequenas alterações, foi desenvolvido em 1935 e publicado em 1936 com a designação Std 11E. Hoje estamos na 18ª edição, lançada em 12 de novembro de 2008. Para realização deste trabalho foi consultada a edição de 1998.

A equação 2.3 representa o cálculo do torque requerido da unidade de bombeio durante os ciclos de bombeamento, segundo o modelo API:

$$T_{Nj} = TF_j(Q_{RLj} - Q_{SU}) - M \sin(\theta_j) \quad (2.3)$$

Onde:

$T_{Nj}$  - Torque líquido, em (Nm);

$TF_j$  - Fator de torque, em (m);

$Q_{RLj}$  - Carga no conjunto de hastes, em (N);

$Q_{SU}$  - Desbalanceamento estrutural, em (N);

$M$  - Momento, em (Nm);

$\theta_j$  - Ângulo da manivela em relação ao eixo de saída do redutor, em (rad).

O método fator de torque API resumidamente prevê que, se o torque líquido fosse constante, então, o balanceamento da unidade de bombeio seria perfeito. Para calcular o torque líquido utilizando a equação 2.3 é necessário se conhecer o fator de torque  $TF_j$ , o desbalanceamento estrutural  $Q_{SU}$ , inferir o ângulo ( $\theta_j$ ), medir a carga na haste polida  $Q_{RLj}$  e conhecer o valor do efeito de contrabalanceamento em cada ângulo (momento), além disso, conhecer a geometria com as respectivas dimensões da UB. Com tudo isto, a aplicação do método passa ser algo para profissionais com profundo conhecimento em elevação artificial por bombeio mecânico e que possa se valer de informações atualizadas. Principalmente este último requisito dificulta a aplicação deste método.

Outro método, baseado no torque líquido, estima o torque líquido máximo requerido do redutor por meio da carga e do curso da haste polida, cujos dados são obtidos da carta dinamométrica de superfície. A equação que representa modelo matemático do método está apresentada a seguir. Este modelo trata de uma aproximação do movimento da haste polida de um movimento harmônico simples. Segundo Gibbs (1975), essa equação só

pode ser usada em casos muito específicos.

$$(T_N) = \frac{S}{4} [(Q_{RL})_{max} - (Q_{RL})_{min}] \quad (2.4)$$

Onde:

$T_N$  - Torque líquido máximo, em (Nm);

$S$  - Curso da haste polida, em (m);

$Q_{RL_{max}}$  - Carga máxima no conjunto de hastes, em (N);

$Q_{RL_{min}}$  - Carga mínima no conjunto de hastes, em (N).

Logo, se conhecendo as cargas por meio da carta dinamométrica, bem como a posição, pode-se inferir o torque líquido máximo. Portanto, reduzindo o valor do torque máximo, para o valor do torque correspondente a carga do fluido, poderia ser obtido o balanceamento de forças na UB. Porém, é comum a sobreposição de fenômenos que ocorrem do fundo à superfície do BM, fenômenos estes que aparecem diretamente nos valores de carga e posição da haste polida, isto dificulta o balanceamento ideal por este método.

O cálculo do torque representado pela equação 2.3, foi modificado por Gibbs (1974), que introduziu, no torque calculado segundo o API, dois termos respectivamente: as inércias devido aos movimentos rotativo e articulado da UB. A equação 2.5 mostra como obter o torque com os respectivos momentos. Estes momentos foram obtidos em função da rotação da manivela e do movimento articulado em relação ao mancal do balancim. Logo, o torque pode ser obtido segundo a equação:

$$T_{Nj} = F_j(Q_{RLj} - Q_{SU}) - M \sin(\theta_j) - I_2 \dot{N}(t_j) + \frac{F_j I_3}{L_5} \ddot{U}(t_j) \quad (2.5)$$

Onde,  $I_2$  - representa o momento inercial rotacional total, tendo como referência a baixa velocidade do eixo do motor.  $\dot{N}$  - representa a aceleração angular, obtida utilizando-se série de Fourier. Esta é derivada da velocidade da UB,  $I_3$  - refere-se ao momento de inércia articulado obtida no mancal do balancim.  $L_5$  - se trata da distância do pivô do balancim até a cabeça do cavalo na UB.  $\ddot{U}$  - representa a aceleração da viga oscilante (balancim).

Portanto, Gibbs modelou e definiu como obter o torque, por meio das cargas, da geometria e dos momentos de inércia do sistema. Apesar de apresentar um modelo mais completo de como obter o torque requerido para elevar o fluido à superfície, o modelo proposto por Gibbs ainda apresenta a mesma dificuldade do método API por exigir uso de conhecimento do especialista para obter êxito. Sua principal contribuição, porém, trabalho

foi inserir no contexto do contrabalanceamento as forças inerciais.

Em paralelo aos métodos discutidos anteriormente, teve-se o desenvolvimento de métodos que possibilitariam o uso da carta dinamométrica sob outra perspectiva, ou, em alguns casos, o seu uso seria dispensável. Estes métodos também serão apreciados nas próximas seções de capítulo, como o propósito de identificar contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

O fator de carga cíclica foi associado ao desbalanceamento de unidades de bombeio por Howell e Hogwood (1962) e definiram que, o CLF, equação 2.6, pode ser obtido por meio da razão entre a corrente eficaz e a média da corrente do motor elétrico durante o funcionamento do BM.

$$CLF = \frac{rms.corrente}{avg.corrente} \quad (2.6)$$

ou seja:

$$CLF = \frac{\sqrt{\frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} [I(\theta)]^2 d\theta}{2\pi}}}{\frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} [I(\theta)] d\theta}{2\pi}} \quad (2.7)$$

Onde:

*CLF* (do termo inglês, *Cyclic Load Factor*) - Fator de carga cíclica;

*rms.corrente* - Média quadrática das correntes (A);

*avg.corrente* - Média aritmética das correntes (A);

*I* - Corrente do motor, em (A);

$\theta$  - Ângulo da manivela, em (rad).

Os motores que acionam as unidades de bombeio são sujeitos às cargas, as quais são cíclicas por natureza. Estas cargas cíclicas afetam o aquecimento do motor e exigem mais potência do mesmo.

O valor do CLF é sempre maior em unidades desbalanceadas do que em unidades balanceadas, isto se dá, pois, nesses casos, o valor da corrente eficaz é maior que a corrente média. Logo, o CLF é um bom indicador para monitorar cargas que flutuam cujas variações dos torques mecânicos refletem diretamente no eixo do motor e, conseqüentemente, no torque elétrico produzido por este. Em cargas estáveis, onde os valores das médias

quadrática e aritmética da corrente são iguais, o valor do CLF tende a 1, porém se o valor do torque requerido pela carga varia, como ocorre no BM, o valor do CLF será maior que 1. Portanto, balanceando as cargas que atuam no sistema visando obter o CLF=1, se teria o balanceamento do sistema.

No entanto, a desvantagem ao se utilizar o CLF, definido conforme o método de Howell e Hogwood, equação (2.6) está no fato de ser necessário ler as correntes instantâneas do motor, durante os ciclos de bombeio. Esta corrente pode sofrer influências de condições anômalas, que estejam ocorrendo alheias ao motor. Por exemplo, a sobreposição de defeitos, tais como fricção na caixa de vedação, desalinhamento de correias entre motor e redutor, fuga de corrente do motor ou cabo para terra, dentre outros.

O estudo realizado por Bird e Beasley (1974) definiu que sob mesmas condições o fator de carga cíclica mecânico e elétrico são praticamente iguais para validar sua hipótese obtiveram os valores médios para diferentes tipos de motores e unidades de bombeio. Além disso, definiram o fator de carga cíclica em função do torque requerido do motor.

Este fator, equação 2.8, é obtido por meio da razão, entre a média quadrática dos valores dos torques médios e, a soma dos torques médios, conforme a seguir:

$$CLF = \frac{(m+1) \sqrt{\frac{1}{m+1} \sum_{j=0}^m (T_{M_j})^2}}{\sum_{j=0}^m T_{M_j}} \quad (2.8)$$

Onde:

$CLF$  - Fator carga cíclica;

$T_M$  - Torque médio, em (Nm);

$m$  - número de amostras.

Eles também definiram que a potência mecânica média, requerida dos motores elétricos pode ser obtida multiplicando-se a potência nominal do motor pelo CLF. Logo, tem-se:

$$P_{mm} = CLF * P_{mot} \quad (2.9)$$

Onde:

$P_{mm}$  - Potência mecânica média, em (W);

$P_{mot}$  - Potência do motor, em (W);

$CLF$  - Fator de carga cíclica.

Um método para dimensionamento de motores elétricos para UB foi apresentado por Durham e Lockherd (1998), onde ele correlaciona as potências: elétrica, mecânica e hidráulica. Além disso, identificou as influências das perdas no cálculo da potência requerida da concessionária de energia.

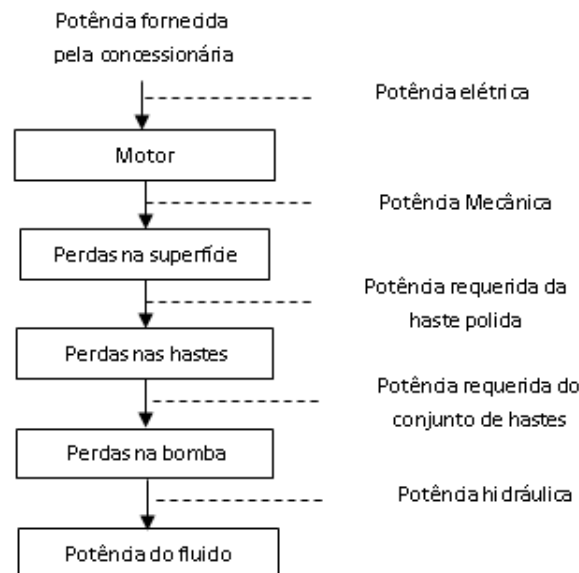


Figura 2.4: Sistema de potência do BM(DURHAM; LOCKHERD, 1998, p.1)

Nesse estudo, Durham também associa a potência requerida da concessionária ao fator carga cíclica. Por meio da figura 2.4, tem-se ilustrado a potência hidráulica sendo somada a potência proveniente da pressão do reservatório para elevar-se à superfície o fluido. Esta potência é transferida ao fluido por meio de uma bomba, que tem perdas associadas às imperfeições ou desgastes de seus componentes. A bomba recebe esta energia através da força da coluna de hastes, que tem perdas associadas principalmente às forças de fricção. A coluna de hastes requisita da haste polida potência, que é fornecida pela unidade bombeio. A UB por sua vez, tem diversas perdas associadas à conversão de energia geralmente se trata de uma conversão de energia elétrica em mecânica. A concessionária é responsável por fornecer energia elétrica ao sistema. Além disso, neste trabalho, o fator de carga cíclica foi associado, à velocidade do motor, ao tipo de unidade de bombeio e ao escorregamento do motor. Devido a estas variações nem sempre é possível utilizar o CLF para definir a potência nominal do motor. A grande contribuição deste trabalho foi definir que motores que acionam unidades convencionais devem ser dimensionados para operar entre 40 e 50%. O estudo foi realizado levando em consideração a curva de motores de indução NEMA D, veja-a no Apêndice C.

O CLF, como definido por Takács (2003), como sendo dado pela relação, entre a

raiz quadrada da média dos torques e a média dos torques líquidos ao longo do ciclo de bombeio:

$$CLF = \frac{\sqrt{\frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} [T_{net}(\theta)]^2 d\theta}{2\pi}}}{\frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} [T_{net}(\theta)] d\theta}{2\pi}} \quad (2.10)$$

Onde:

$CLF$  - fator de carga cíclica;

$T_{net}$  - Torque líquido, em (Nm);

$\theta$  - Ângulo da manivela, em (rad).

Takács propôs obter o valor do CLF, por meio de valores do torque líquido medidos na haste polida do sistema de bombeio mecânico. A grande contribuição deste trabalho foi a proposta de minimizar o valor do CLF como critério para balanceamento da unidade de bombeio.

No trabalho apresentado por Takács tem-se que a potência requerida de uma unidade de bombeio pode ser reduzida minimizando o CLF. Além disso, propõe que o valor do CLF está associado às condições de balanceamento da UB. Também mostra que ao ajustar a posição dos contrapesos, visando obter o melhor ponto, tem-se o balanceamento da UB, e, por conseguinte, o mínimo fator de carga cíclica (CLF). Portanto, reduzindo o valor do CLF ao mínimo, tem-se o menor consumo de energia.

Ainda de acordo com Takács (2003) , o balanceamento de uma unidade de bombeio consiste em equilibrar as cargas rotacionais no eixo da caixa redução de velocidade durante o ciclo de bombeamento. Sem contrabalancear a UB, o torque no redutor será alto durante o curso ascendente, quando a carga é alta na haste polida. Por outro lado, durante o curso descendente a carga na haste decai levando o torque na saída do redutor a valores negativos.

Portanto, para aplicar o método de Takács é necessário conhecer o valor dos torques líquidos durante o ciclo de bombeio. Logo, a desvantagem do método está associada à necessidade de se usar sensores externos, para realizar a medições da carga e posição da haste polida. Além disso, quando as medições dessas grandezas estão disponíveis, tem-se a desvantagem de ser necessário verificar os sensores com determinada frequência.

Dispositivos digitais foram utilizados por McCoy "e colaboradores"(1997) para realizar



a medição da potência instantânea do motor do sistema de bombeio mecânico. Por meio de um software estes converteram a potência medida em torque, e, obtiveram a curva de torque durante os cursos ascendente e descendente. O método também previu a determinação do nível do desbalanceamento e permitiu determinar o ajuste dos contrapesos, visando obter o ajuste ideal e, por conseguinte obteve a redução no consumo de energia. O método tem a vantagem de se poder balancear a unidade de bombeio, sem a necessidade de conhecer a geometria da mesma.

No entanto, para aplicar o método de McCoy deve-se considerar a eficiência média do motor da UB constante em seus estudos este considerou  $Eff = 80\%$ . Além disso, é necessário medir a potência, e, inferir ou medir a velocidade de bombeio, sendo:

$$CLF = 84484 \times Eff \times \frac{Power}{SPM} \quad (2.11)$$

Onde:

$Eff$ - Eficiência do motor, em (%);

$Power$ - Potência do motor, em (W);

$SPM$ - Velocidade de bombeio, em (ciclos/mim).

Apesar de não ser necessário inferir o torque por meio da carta dinamométrica de superfície, como no método proposto por Takács, o fato de ser necessário conhecer ou estimar a eficiência do motor é uma desvantagem. Isto porque, a depender do fator de carga do motor, o seu rendimento se altera. Motores elétricos que equipam unidade de bombeio podem ser sobre dimensionados, em função do desbalanceamento de carga, o que aumenta a influência do fator rendimento.

Por meio dos valores de tensão, corrente e parâmetros estimadores Beck "e outros"(2007) obtiveram o torque, dispensando o uso de sensores externos. As grandezas elétricas tensão e corrente foram obtidos em um inversor de velocidade que alimenta a UB. No entanto, os parâmetros estimadores representam grandezas que constituem o modelo do sistema, isto torna o método pouco aplicável, pois, os parâmetros não podem ser facilmente obtidos. Este sistema foi protegido pela patente: US 7.168.924.

Um sistema para controlar o torque líquido do BM manipulando a velocidade do motor foi desenvolvido por (PETERSON, 2008). Como se sabe durante os cursos ascendentes e descendentes há variação no torque do sistema e, por conseguinte, da potência requerida do motor. Isto se dá por que o motor sempre visa manter a velocidade constante, isto, quando a frequência é mantida constante. Para isto precisa respeitar a relação de pro-

porcionalidade entre a velocidade do campo girante e do rotor. No trabalho desenvolvido por Peterson a velocidade é manipulada visando manter o torque constante. Ou seja, se durante o curso descendente a velocidade de bombeio tende a aumentar, então, o controlador manda reduzir a velocidade do motor. Assim como, se durante o curso ascendente a velocidade de bombeio tende a reduzir, então, o controlador comanda aumentar a velocidade do motor por meio do inversor de frequência. Com isto, o torque líquido é mantido dentro de valores limitados. A faixa de variação do torque depende da precisão do controle. Este trabalho mostrou que é possível controlar o torque com o propósito de reduzir a vibração do sistema.

## 2.3 Considerações Finais

As contribuições e limitações ao aplicar alguns dos métodos discutidos, neste capítulo, estão na sua maioria ligados à necessidade de medir ou inferir o torque, sendo muitas vezes necessário utilizar dados extraídos de cartas dinamométricas de superfície e, da indispensável análise de um especialista em elevação artificial de petróleo. Diante disso, aplicá-los se torna mais dispendioso quando comparado com os métodos baseados em CLF. No entanto, devido ao fato da determinação do CLF apresentar as limitações descritas anteriormente, este trabalho tem como proposta principal transpor tais dificuldades redefinindo o CLF utilizando valores de tensão medidos em um barramento DC de um inversor de frequência. Com isto, o sistema proposto facilita a aplicação do método de minimização do CLF proposto por Takács, mas dispensando medir a carga e deslocamento, e o uso da geometria da UB. Outra abordagem inovadora do trabalho consiste em projetar um controlador de torque, utilizando dos mesmos valores da tensão DC, como variável de processo e manipulando a velocidade de uma unidade de bombeamento para minimizar a variação do torque líquido. Este controlador deve ter vantagens quando comparado com o trabalho de Peterson, porque dispensa o uso de um sensor externo para medição de velocidade, pois esta informação está disponível nos inversores de frequência.

### 3 Modelo - Balanceamento do BM

O modelo de um sistema mecânico corresponde a uma representação idealizada do sistema físico real, com a intenção de permitir o estudo de algumas de suas características. A representação do sistema real, em geral complexa, é feita inicialmente de forma simplificada, contemplando os aspectos relevantes de interesse.

Os modelos que representam o sistema de bombeio mecânico foram propostos por especialistas em sistema de bombeio. Segundo Takács (2003) , esses modelos apresentam a precisão necessária ao calcular os parâmetros operacionais válidos na superfície e no fundo do poço.

Diante da perspectiva de conhecer o comportamento do sistema de bombeio mecânico, em condições de balanceamento, é essencial o estudo do equilíbrio das forças que atuam no mesmo. Para isto é preciso conhecer os efeitos provocados pelas forças visando definir a força resultante que atua no sistema. Esses efeitos aparecem principalmente na haste polida e na UB.

Analisando o movimento da coluna de hastes de um sistema de bombeio mecânico, pode-se aproximar de um movimento similar ao movimento harmônico simples, com valores de amplitudes sendo representados pelas cargas, que são diferentes na subida e descida do conjunto de hastes. Daí vem à necessidade de se utilizar contrapesos dimensionados e posicionados de maneira tal que o efeito produzido por estes, durante os cursos ascendentes e descendentes, permita produzir um efeito correspondente a uma força resultante igual a zero. Em primeira análise é possível prever um valor para o contrapeso. O efeito provocado pelo contrapeso será sempre menor que o valor da carga máxima, e maior que a carga mínima durante os ciclos de bombeio.

De acordo com Triggia (2010) , o balanceamento do BM pode ser estudado de maneira simplificada. Mas, é preciso aprofundar nos detalhes do balanço de cargas da UB. Este estudo será descrito nos próximos tópicos deste capítulo. Os métodos construídos e validados neste trabalho também subsidiam os trabalhos em andamento do projeto proposto

à Petrobras - Sistema para Balanceamento Otimizado de Unidades de Bombeio Mecânico. Proposta apresentada no VIII Encontro Técnico de Bombeio Mecânico na referida empresa.

### 3.1 Unidades de Bombeio

As unidades de bombeio são responsáveis por converter o movimento rotativo de um motor em um movimento vertical da haste polida. A descrição detalhada dos componentes da UB já foi demasiadamente apresentada em outras publicações e podem ser encontradas em (TAKÁCS, 2003; THOMAS et al., 2001). Na figura 3.1 tem-se ilustradas os principais componentes de uma UB.



Figura 3.1: UB do Laboratório de Elevação Artificial da UFBA

#### 3.1.1 Transmissão da Força da Haste Polida à Manivela

Para a realização deste estudo foi considerada uma UB convencional, porque este modelo é o mais utilizado no Brasil. Observando uma dessas unidades de bombeamento, pode-se extrair um modelo geométrico, conforme apresentado na figura 3.2 devida à construção da "cabeça de cavalo", a força  $W$  (na haste polida) estará sempre a uma distância  $a$  do ponto  $P$ . Essa força será transmitida à manivela com o valor da força  $F_p$ .

Na figura a seguir tem-se a distribuição de forças pesos atuando respectivamente no

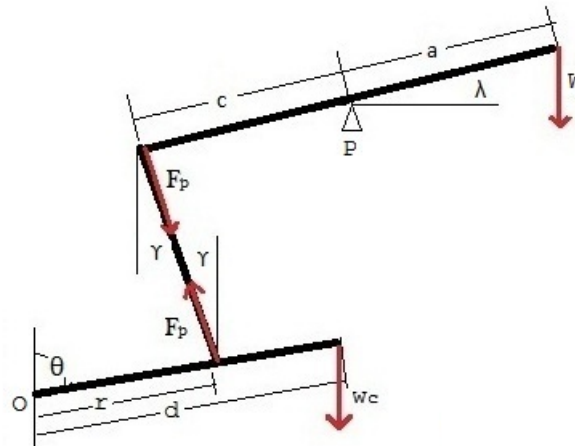


Figura 3.2: Esquema simplificado da unidade de bombeio

balancim e na manivela:

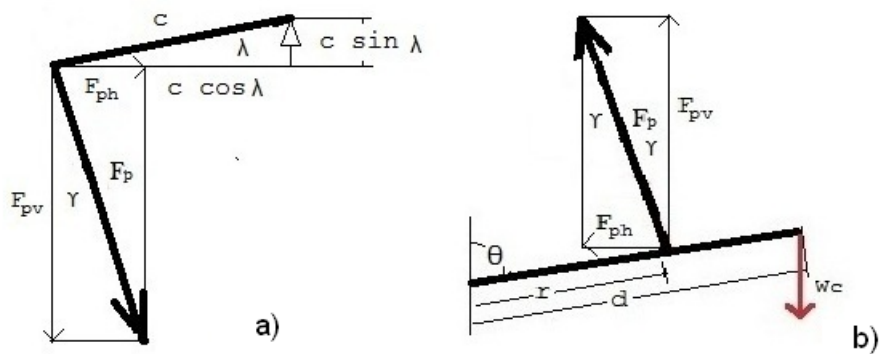


Figura 3.3: Decomposição de forças na unidade de bombeio

Tomando-se os momentos com relação ao ponto  $P$  nas figuras 3.2 e 3.3a, obtém-se:

$$Wa(\cos \lambda) = F_{pv}(c \cos \lambda) + F_{ph}(c \sin \lambda) \quad (3.1)$$

De acordo com a figura 3.3a e substituindo os termos  $F_{pv}$  e  $F_{ph}$ :

$$Wa(\cos \lambda) = (F_p \cos \gamma)(c \cos \lambda) + (F_p \sin \gamma)(c \sin \lambda) \quad (3.2)$$

Sendo,  $F_p$ :

$$F_p = \frac{Wa \cos \lambda}{c(\cos \gamma \cos \lambda + \sin \gamma \sin \lambda)} \quad (3.3)$$

Logo:

$$F_P = W \frac{a \cos \lambda}{c \cos(\gamma - \lambda)} \quad (3.4)$$

Tomando os momentos com relação ao ponto  $o$  da figura 3.2b, tem-se:

$$W_c d \sin \theta = F_{pv}(r \sin \theta) + F_{ph}(r \cos \theta) \quad (3.5)$$

Sendo:

$$W_c d \sin \theta = (F_p \cos \gamma)(r \sin \theta) + (F_p \sin \gamma)(r \cos \theta) \quad (3.6)$$

Portanto,  $F_P$ :

$$F_P = \frac{W_c d \sin \theta}{r(\cos \gamma \sin \theta) + (\sin \gamma \cos \theta)} \quad (3.7)$$

Ou seja,  $F_P$ :

$$F_P = W_c \frac{d \sin \theta}{r \sin(\theta + \gamma)} \quad (3.8)$$

A equação 3.4 mostra a relação entre a força na haste polida e a força na biela que pelo princípio da ação e reação, é igual à transmitida para a manivela.

A equação 3.8 relaciona a força  $F_P$  na biela com a força  $W_c$  (peso do contrapeso). A próxima seção deste capítulo apresenta o efeito produzido pelos contrapesos no torque da UB.

## 3.2 Cálculo do Efeito de Contrabalanceamento (CBE)

Observando-se a geometria da UB figura 3.1, tem-se os contrapesos colocados na manivela, esses elementos provocam um efeito na haste polida durante o ciclo de bombeio. Este fenômeno é denominado como efeito de contrabalanceamento, *CBE*. Para que o balanceamento da unidade de bombeio seja ideal, o *CBE* deveria produzir um efeito, tal que a variação do torque requerido da UB tendesse a zero.

Para melhor compreender como seria possível balancear uma unidade de bombeio,

torna-se preciso analisar o balanço de massa do sistema. No esquema representado pela figura 3.2,  $W_c$  representa a força produzida pelos pesos colocado na manivela conforme figura 3.1, o qual terá o seu efeito na haste polida. Esse efeito deverá ser igual ao CBE para que a UB esteja balanceada.

Portanto, se  $CBE$  representa o efeito de contrapeso,  $PPRL$  a carga máxima na subida e  $MPRL$  a carga mínima na descida, então para equilibrar o sistema, tem-se:

$$PPRL - CBE = CBE - MPRL \quad (3.9)$$

Ou, ainda:

$$CBE = \frac{PPRL + MPRL}{2} \quad (3.10)$$

Essa força exercida pelo contrapeso é gerada pelo efeito do contrabalanceamento, quando  $W_c$  é colocado a uma distância  $d$  na manivela.

Fazendo  $W = CBE$  na equação 3.4 e substituindo  $FP$  na equação 3.8 tem-se:

$$F_p = CBE \frac{a}{c} \frac{\cos \lambda}{\cos(\gamma - \lambda)} \quad (3.11)$$

Lembrando que esta equação foi obtida igualando os momentos com relação ao ponto  $O$ , significa dizer que, para esse equilíbrio, o momento (torque) é nulo.

Substituindo  $F_p$  na equação 3.8, tem-se:

$$CBE \frac{a}{c} \frac{\cos \lambda}{\cos(\gamma - \lambda)} = W_c \frac{d}{r} \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \gamma)} \quad (3.12)$$

Como as unidades de bombeio mecânico têm um desbalanceamento estrutural  $SU$ , que pode ser positivo ou negativo, logo se pode escrever a equação 3.12, assim:

$$(CBE - SU) \frac{a}{c} \frac{\cos \lambda}{\cos(\gamma - \lambda)} = W_c \frac{d}{r} \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \gamma)} \quad (3.13)$$

Fazendo  $W_c d = M$ , tem-se:

$$CBE = SU + M \frac{c}{ar} \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \gamma)} \frac{\cos(\gamma - \lambda)}{\cos \lambda} \quad (3.14)$$

A equação 3.14 fornece o valor do  $CBE$  para um determinado valor de momento  $M$ , note que o  $CBE$  é dado em função dos ângulos  $\theta, \gamma$  e  $\lambda$ .

Por que pelo método API,  $CBE$  é considerado constante. Isto se deve ao fato de ser considerado o ângulo  $\gamma$  igual ao  $\sin \gamma$  muito pequeno, ou seja,  $\gamma$  é aproximadamente zero (0). Assim a fórmula 3.14, fica:

$$CBE \cong SU + M \frac{c}{ar} \quad (3.15)$$

Esta equação mostra  $CBE$  constante para cada  $M$  escolhido, depende do modelo da UB.

Da equação 3.15, pode-se obter o valor  $M$ , portanto, este é dado por:

$$M = (CBE - SU) \frac{ar}{c} \quad (3.16)$$

Para compreender como funciona o balanceamento de cargas em UBs, os próximos tópicos apresentam como é definido o desbalanceamento estrutural e o equilíbrio de forças de maneira generalizada.

### 3.3 Desbalanceamento Estrutural da Unidade de Bombeio

Observando-se a biela e a haste polida da UB, figura 3.4, então, se teria três possíveis condições, conforme abaixo:

Se fosse necessário indicar um valor de um peso para ser colocado na viga, com o propósito de se obter o equilíbrio, seria necessário:

*Caso(a)* :  $+SU$

*Caso(b)* :  $0$

*Caso(c)* :  $-SU$

Nos casos (a) e (c) as unidades estão desbalanceadas, no caso (b) não.

no caso (a) o desbalanceamento aumenta o torque requerido do motor do BM durante o curso ascendente (maior torque requerido da UB)



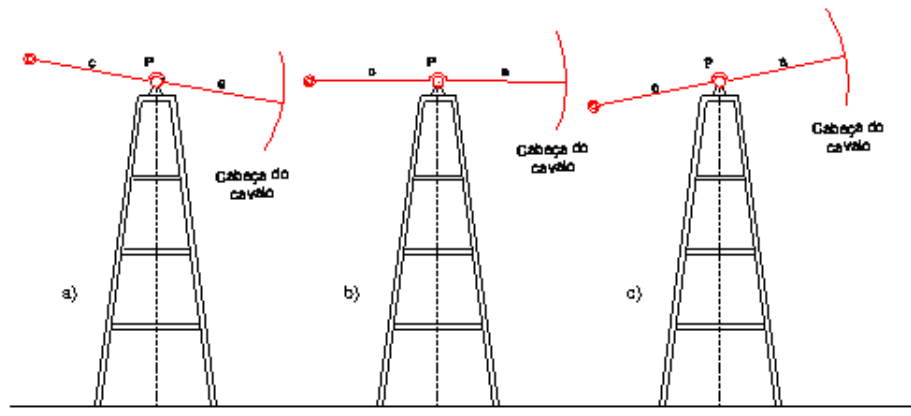


Figura 3.4: Esquema do desbalanceamento estrutural da UB

No caso (c), o desbalanceamento ajuda a reduzir o torque requerido do motor do BM durante o curso ascendente (menor torque requerido da UB)

O valor de  $SU$  é fornecido pelo fabricante da unidade de bombeio. Na sua falta, pode ser determinado facilmente inferindo o valor da carga por meio de um dinamômetro.

### 3.4 Generalidades Sobre Contrapeso

Supondo que irá se elevar um peso  $W_s$ , tem-se:

$$W_s = W_r + W_c \quad (3.17)$$

Onde,

$W_r$  : Peso do recipiente que contém a carga

$W_c$  : Peso da carga a ser elevada

Assim, na subida, temos uma carga total  $W_s$  e na descida, após descarregar a carga  $W_c$ , o peso na descida será:

$$W_d = W_r \quad (3.18)$$

O contrapeso  $C_s$  (força) é definido por:

$$W_s - C_s = C_s - W_d \quad (3.19)$$

Ou seja:

$$C_s = \frac{1}{2}(W_s + W_d) \quad (3.20)$$

Utilizando-se o esquema da figura 3.5, para calcular o momento (torque) necessário para a subida da carga.

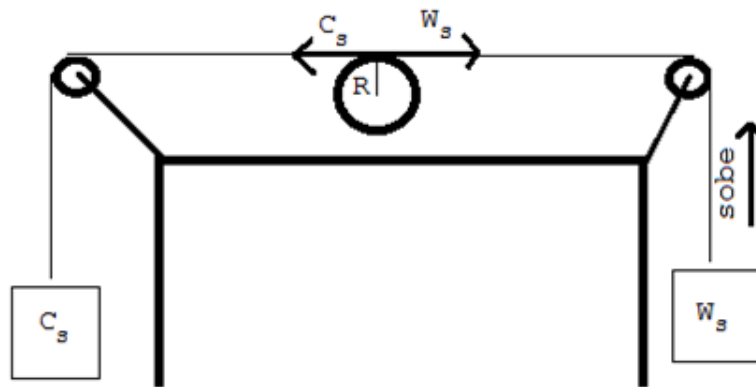


Figura 3.5: Esquema genérico de forças - BM

Na subida, o momento aplicado em  $R$  será:

$$M = C_s R - W_s R = \left(\frac{1}{2}W_s + \frac{1}{2}W_d - W_s\right)R = \frac{1}{2}(W_d - W_s)R \quad (3.21)$$

Na descida, o momento aplicado em  $R$  será:

$$M = W_d R - C_s R = \left(W_d - \frac{1}{2}W_s - \frac{1}{2}W_d\right)R = \frac{1}{2}(W_d - W_s)R \quad (3.22)$$

Logo, os momentos requeridos na subida e na descida são os mesmos. Sendo  $W_s = C_s$ , tem-se:

$$M = C_s R - C_s R \quad (3.23)$$

Isto é, quando o efeito produzido pelo contrapeso for igual à carga de subida, o mo-

mento  $M$  será nulo.

### 3.5 Cinemática das Unidades de Bombeio

Para estudar o comportamento dinâmico do BM é preciso conhecer o fator de torque, determinar o curso, a carga e os ângulos formados pelas partes móveis da UB.

Como a teoria sobre estas variáveis e parâmetros é bastante conhecida, esta seção se limita a apresentar as fórmulas, que são função das dimensões da unidade. A figura 3.6 mostra as dimensões que devem ser conhecidas para o cálculo destes ângulos.

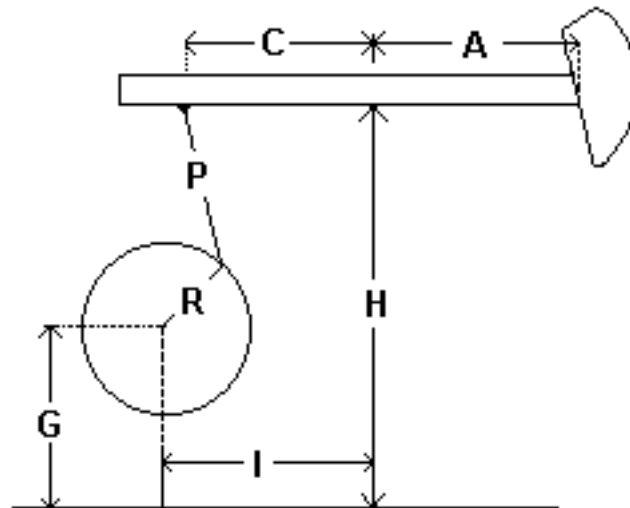


Figura 3.6: Dimensões da UB

Os ângulos calculados são os mostrados no esquema representado pela figura 3.7.

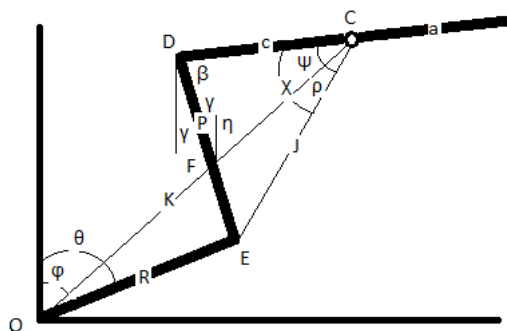


Figura 3.7: Ângulos da UB

Os cálculos destes ângulos serão feitos através das seguintes fórmulas:

$$K = \sqrt{(H - G)^2 + I^2} \quad (3.24)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{1}{K} \quad (3.25)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{C^2 + P^2 - K^2 - R^2 + 2KR \cos(\theta - \varphi)}{2CP} \quad (3.26)$$

$$\psi = \sin^{-1} \frac{P \sin(\beta)}{h} - \sin^{-1} \frac{R \sin(\theta - \varphi)}{h} \quad (3.27)$$

$$J = \sqrt{R^2 + K^2 - 2KR \cos(\theta - \varphi)} \quad (3.28)$$

$$\alpha = \beta + \psi - (\theta - \varphi) \quad (3.29)$$

Os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  são utilizados para calcular o fator de torque utilizado no cálculo do torque na haste polida.

## 3.6 Cálculo de Torque Líquido no BM

A redução dos impactos produzidos pelo desbalanceamento em unidade de bombeio ocorre quando se reduz o torque instantâneo ou líquido do sistema. Este é resultante da soma de três tipos de torques que agem em uma UB: torque na haste polida, torque produzidos pelos contrapesos e torques inerciais. Portanto, compreender como minimizar o torque líquido é possibilitar a obtenção do balanceamento ideal do sistema.

O torque líquido atua diretamente no redutor de velocidade, sendo este obtido pela diferença dos torques que agem no sistema. Este torque será o mesmo produzido pelo motor conectado ao redutor. As subsecções a seguir apresentam os referidos torques e mostram como obter o torque líquido.

### 3.6.1 Torque na Haste Polida

O torque na haste polida é frequentemente calculado por:

$$T_r(\theta) = TF(\theta)[F(\theta) - SU] \quad (3.30)$$

$T_r(\theta)$  - Torque produzido pelas cargas na haste polida, em  $(Nm)$ ;

$TF$  - Fator de torque, em  $(m)$ ;

$F(\theta)$  - Carga no conjunto de hastes, em  $(N)$ ;

$SU$  - Desbalanceamento estrutural, em  $(N)$ ;

$\theta$  - Ângulo da manivela, em  $(rad)$ .

O Fator de Torque  $TF$  pode ser definido como:

$$TF(\theta) = \frac{RA \sin(\alpha)}{C \sin(\beta)} \quad (3.31)$$

Onde:

$TF$  - Fator de torque, em  $(m)$ ;

$A, C, R$  - Dimensões da UB, em  $(m)$ ;

$\alpha, \beta$  - ângulo da UB, em  $(rad)$ .

### 3.6.2 Torque Produzidos Pelos Contrapesos

Como este estudo está sendo realizado baseando-se em unidades de bombeio convencionais, quando um conjunto de massas, devidamente dimensionado, é colocado na manivela gera um efeito produzindo o contrabalanceio do sistema. Este efeito, denominado momento, é obtido pelo produto valor do peso deste conjunto pela distância do centro de massa ao centro do eixo do redutor. O efeito produzido varia em função do ângulo da manivela. Portanto, o torque produzido pelos contrapesos é dado por:

$$T_{CB}(\theta) = -M \sin(\theta) \quad (3.32)$$

Onde:

$T_{CB}$  - Torque dos contrapesos, em  $(Nm)$ ;

$M$  - Momento máximo na manivela do redutor, em  $(Nm)$ ;

$\theta$  - ângulo da manivela, em  $(rad)$ .

Além destes componentes outros dois torques de menor módulo costumam aparecer quando a velocidade da unidade varia. Estes torques são denominados como torques inerciais.

Como será utilizada na análise de torques a norma API Spec. 11 E, estes torques serão desprezados no cálculo do torque líquido do sistema.

### 3.6.3 Torque Líquido

Essencialmente, o torque líquido resultante na saída do redutor de velocidade, considerando a API Spec. 11 E será dado por:

$$T_{net}(\theta) = T_r(\theta) - T_{CB}(\theta) \quad (3.33)$$

Onde:

$T_{net}$  - Torque Líquido, em (Nm);

$T_r(\theta)$  - Torque produzidos pelas cargas no eixo do redutor, em (Nm);

$T_{CB}$  - Torque dos contrapesos, em (Nm);

$\theta$  - ângulo da manivela, em (rad).

$$T_{net}(\theta) = TF(\theta)[F(\theta) - SU] - M \sin(\theta) \quad (3.34)$$

Onde:

$T_{net}$  - Torque Líquido, em (Nm);

$TF$  - Fator de torque, em (m);

$F(\theta)$  - Carga no conjunto de hastes, em (N);

$SU$  - Desbalanceamento estrutural, em (N);

$M$  - Momento máximo na manivela do redutor, em (Nm);

$\theta$  - ângulo da manivela, em (rad).

A posição ideal para colocar os contrapesos pode dado por:

$$Dmg \sin(\theta) = M \sin(\theta) \quad (3.35)$$

$$D = \frac{M}{mg} \quad (3.36)$$

Onde:

$D$  - Posição ideal para os contrapesos, em (m);

$M$  - Momento máximo na manivela do redutor, em  $(Nm)$ ;

$m$  - Massa dos contrapesos, em  $(kg)$

$g$  - Módulo da aceleração da gravidade, em  $(m/s^2)$

$\theta$  - ângulo da manivela, em  $(rad)$ .

Para Testar e validar o modelo apresentado neste capítulo foi desenvolvido um programa em MatLab. Este programa, além de calcular os torques, permite analisar o comportamento quando os contrapesos são colocados na posição ideal ou fora desta. Os detalhes do programa se encontram descritos no Apêndice A, e os resultados de um estudo de caso são apresentados a seguir.

### 3.7 Estudo de Caso

Para testar o programa desenvolvido e validar o modelo apresentado foi realizado um estudo de caso. Os dados de entrada do programa foram extraídos da UB padrão API-25 utilizada no LEA (Laboratório de Elevação Artificial da UFBA) e os valores de carga e posição foram simulados. O propósito da simulação foi poder controlar e identificar os pontos de máximo e mínimo. Como resultado se têm a carta dinamométrica e os gráficos de torques em função da posição dos contrapesos. A análise dos gráficos pode ser feita sob duas perspectivas, sistema desbalanceado e balanceado.

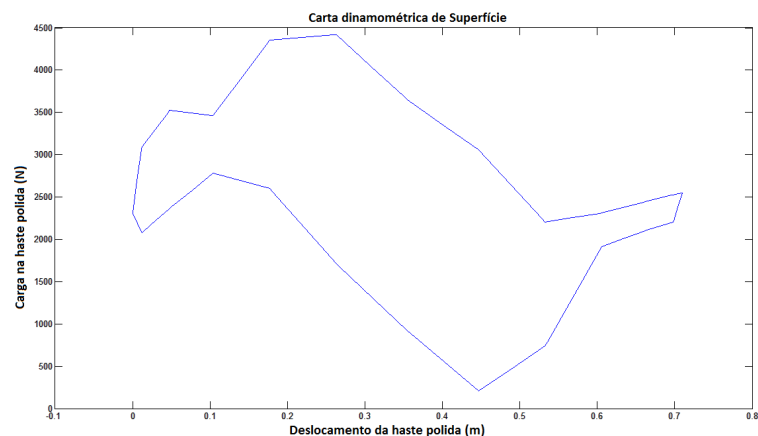


Figura 3.8: Carta dinamométrica

Por meio do sistema desenvolvido é possível se obter a carta dinamométrica de superfície, como a apresentada na figura 3.8. Esta correlaciona os valores de carga e posição. A carta dinamométrica foi gerada tendo como base valores simulados na fase de implantação do sistema em um poço real, a carta gerada representará uma condição de operação

real.

O gráfico representado na figura 3.9 representa a unidade de bombeio com os contrapesos na posição zero, ou seja, o momento gerado por estes elementos é igual a zero.

Nesta condição, se tem uma unidade de bombeio desbalanceada, com todo torque necessário para se elevar à superfície o fluido sendo fornecido pelo motor elétrico, responsável pelo acionamento da UB.

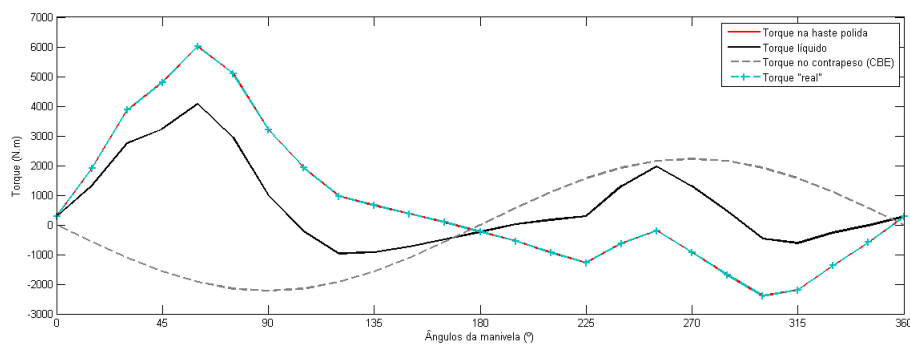


Figura 3.9: UB desbalanceada - Contrapesos na posição (0m)]

Rodando-se o programa, que tem modelo descrito na seção anterior a esta, com os dados adquiridos, obtém-se a posição ideal onde se devem colocar os contrapesos, sendo esta apresentada na figura 3.10. Ela representa a distância que os contrapesos precisam ser colocados na manivela. O ponto zero (0) é o centro do eixo de saída do redutor de velocidade da UB.

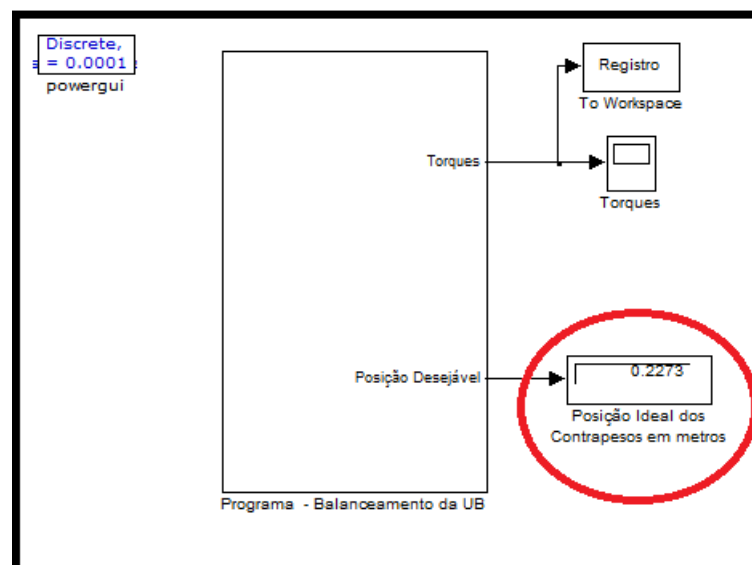


Figura 3.10: Diagrama de blocos - Programa de balanceamento da UB



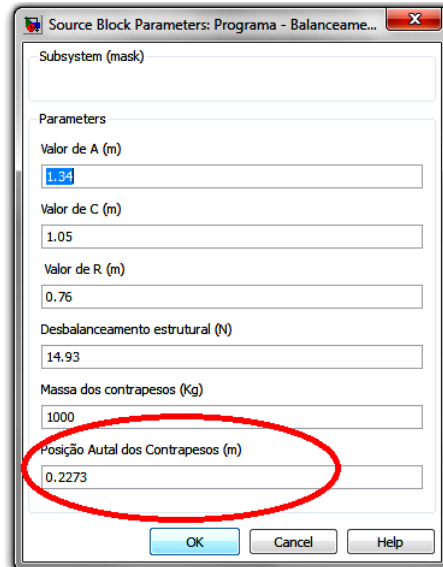


Figura 3.11: Interface para ajustes de parâmetros da UB

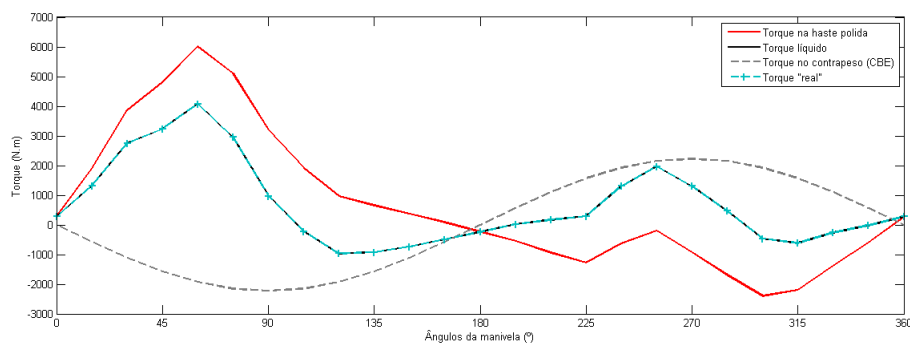


Figura 3.12: Contrapesos na posição ideal

Por meio da interface, ilustrada na figura 3.11, é possível se prever o comportamento do torque do sistema que irá produzir um torque denominado como líquido. Portanto, quando o torque requisitado pelo sistema é igual ao torque líquido ideal, calculado, tem-se a disposição uma unidade de bombeio balanceada.

A condição de balanceamento do sistema está representada na figura 3.12, onde é possível constatar que, ao colocar o contrapeso na posição ideal, os torques ideal e requisitados pelo sistema são iguais.

Na figura 3.13 tem-se ilustrado, como ficaria o torque líquido do sistema, se os contrapesos fosse colocados em uma posição qualquer, mostrando um sistema desbalanceado.

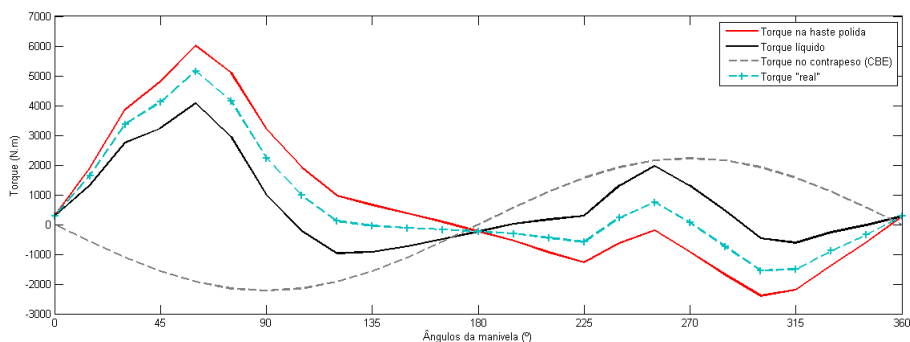


Figura 3.13: Contrapesos em uma posição qualquer

## 3.8 Considerações Finais

O propósito de entender como é possível obter o torque líquido em unidades de bombeio convencionais foi atingido. Como resultado, tem-se um descritivo pormenorizado de como e quando ocorre o equilíbrio de forças no sistema. Também se tem à disposição um programa para apoiar o balanceamento, tendo, como base, cargas, posição e geometria da UB. A etapa subsequente do trabalho tem seu foco no estudo dos atuais métodos utilizados para determinar o valor de M e o CLF.

## 4 Contrabalanceamento da Unidade de Bombeio

O desbalanceamento ocorre devido à má distribuição de massa no eixo do rotor de uma máquina. Esta má distribuição é uma das principais causas de vibração em equipamentos rotativos. O fenômeno de desbalanceamento ocorre a uma vez, na frequência nominal de uma máquina. A vibração excessiva provocar avarias em estruturas, geralmente, causadas por fadiga. Também pode gerar falhas em rolamentos devido à carga excessiva. Além disso, a vibração é transmitida para todas as partes do equipamento, podendo provocar outros problemas. Outro inconveniente do excesso de vibração é o ruído externo excessivo. Tudo isso, reduz a duração e a vida útil do equipamento em serviço, além de que O consumo de energia é maior em um sistema desbalanceado. Isto ocorre devido ao torque mais alto requerido pela carga. Fazendo com que os motores elétricos sejam mais requisitados durante o ciclo de operação, perdendo energia, principalmente devido ao efeito Joule.

Como já comentado o sistema de bombeio mecânico tem um desbalanceamento proveniente da má distribuição de força durante os cursos ascendente e descendente. Para reduzir este desequilíbrio é comum se instalar um conjunto de massas (pesos) na unidade bombeio. A este recurso dá se o nome de contrabalanceamento. Quando este consegue produzir efeitos que levem o sistema exigir somente a energia suficiente para elevar o petróleo à superfície, o contrabalanceamento é dito ideal.

Diante deste contexto, o principal objetivo do contrabalanceamento de uma unidade de bombeio é garantir que o torque requerido pela carga seja o mesmo durante todo ciclo de bombeio. O uso de contrapesos instalados na viga oscilante ou na manivela ou de um cilindro de ar produz um torque oposto ao requerido pela coluna de hastes, reduzindo o torque líquido requerido pela UB, (TAKÁCS, 2003). A magnitude do torque é facilmente alterada (modificando a massa dos contrapesos e, ou, as suas posições), uma ótima ou ideal condição de contrabalanceamento frequentemente pode ser encontrada. O uso adequado dos contrapesos tem muitos benefícios, tais como:

- Reduzir o tamanho (classificação de torque) pode ser significativamente reduzido, quando comparado com uma condição de desbalanceamento.
- O tamanho do motor requerido também é menor, com demanda de energia baixa energia para bombeamento;
- A operação é mais suave, proveniente do equilíbrio de cargas no redutor de velocidade, reduz as perdas com o custo de manutenção e a vida útil do equipamento é aumentada.

Diante da perspectiva de contrabalancear a unidade de bombeio por meio de um método clássico, neste capítulo, serão estudados os principais métodos para determinar o valor do momento  $M$ , responsável por possibilitar isto. Com isto, o valor de  $M$  é determinado em função do CLF, e, por mais dois métodos diferentes.

## 4.1 Métodos - Cálculo de $M$ - Momento Máximo de Contrabalanceamento

No capítulo 3,  $M$  foi definido em função das forças e da geometria da UB. Nesta fase, o que se pretende é mostrar que se conhecendo o  $M$  é possível definir a posição ideal para os contrapesos.

Em unidades de bombeio mecânico equipadas com inversores de frequência no acionamento dos motores, o ato de contrabalancear pode ser realizado com mais facilidade utilizando o  $CLF$ . Será mostrado que, entre os métodos utilizados para o balanceamento da UB, o do mínimo CLF pode ser a primeira opção do especialista.

Triggia (2010) desenvolveu um programa para o cálculo de  $M$  pelos métodos CLF, API e torques máximos, utilizando os seguintes dados:

- 1) Carta dinamométrica de superfície
- 2) Desbalanceamento estrutural da UB
- 3) Cinemática da UB

Este programa realiza o cálculo de  $M$  para os três métodos, e faz um paralelo entre eles para realizar o balanceamento da UB. Na sequência, calcula o torque máximo da UB e a potência requerida para o motor. Os três métodos usados são descritos a seguir.

### 4.1.1 Método - Cálculo de $M$ por CLF

O método proposto por Takács para determinar o  $CLF$ , consiste no seguinte:

- Calcula-se o torque da UB utilizando os dados da UB e da carta dinamométrica, escolhendo-se um valor para  $M$ . Aplicando-se a fórmula 2.8 de Bird e Beasley (1974), calcula-se o  $CLF$  correspondente ao valor de  $M$ ;
- Repete-se esse cálculo para vários valores de  $M$  e o que gerar o menor CLF será o escolhido para balancear a unidade de bombeio.

### 4.1.2 Método - Cálculo de $M$ por CBE e SU

O segundo e mais usual método, é denominado como API, calcula  $M$  da seguinte maneira:

$$CBE = \frac{PPRL + MPRL}{2} \quad (4.1)$$

$$M = \frac{CBE - SU}{TF_{90^\circ}} \quad (4.2)$$

Onde,

$PPRL$  - carga máxima na haste polida, em (N);

$MPRL$  - carga mínima na haste polida, em (N);

$CBE$  - efeito de contrapeso, em (N);

$SU$  - desbalanceamento estrutural da UB, em (N);

$TF$  - Fator de Torque a  $90^\circ$ , em (m).

### 4.1.3 Método - Cálculo de $M$ por Torques Máximos

O terceiro método iguala os torques máximos nos cursos, ascendente e descendente. Este método se encontra descrito em (TILIMPES, 1987). Sendo  $M$  obtido conforme abaixo:

$$M = \frac{Twl_1 - Twl_2}{\sin \theta_2 - \sin \theta_1} \quad (4.3)$$

Onde,

$Twl_1$  e  $Twl_2$  - torques máximos, em (Nm);

$\theta_2$  e  $\theta_1$  - ângulos correspondentes aos torques máximos, em ( $rad$ ).

## 4.2 Estudo de Caso

Na figura 4.1 tem-se ilustrado um estudo de caso utilizando o programa desenvolvido por (TRIGGIA, 2010). Analisando-se esta figura tem-se um exemplo de uso do aplicativo, onde o método do *CLF* mínimo proposto por Takács, se mostra melhor para especificação e balanceamento da UB. Isto pode ser comprovado, comparando este método com o primeiro, *CBE*, adotado pela API, sendo a potência do motor, calculada por meio do *CLF* mínimo, 4,2% menor. Também se tem, que o *CLF* para o conjunto de unidade de bombeio, o motor é 3,2% menor. Outro aspecto muito importante refere-se ao torque máximo, ao invés de se utilizar uma unidade de bombeio API 80, teria que se utilizar uma API 114.

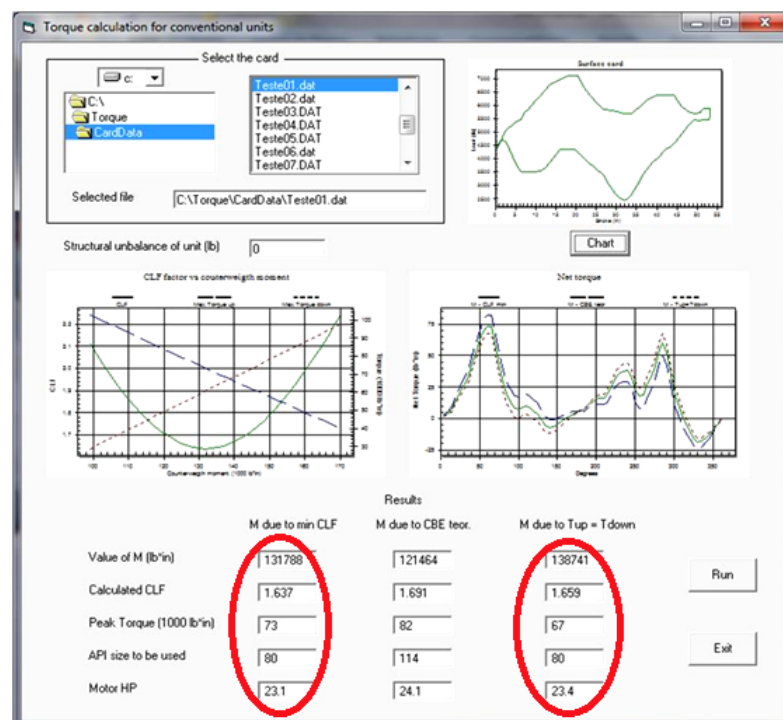


Figura 4.1: Programa - Cálculo de torque de unidade de bombeio convencional. (TRIGGIA, 2010)

Ainda é possível verificar por meio da mesma figura, que o método mínimo *CLF* e o método torques máximos nos cursos, ascendentes e descendentes têm valores de torque muito próximos. Porém, quando se atenta para o efeito de contrabalanceamento (*CBE*), o

método torques máximos, nos dois cursos, provoca uma elevação brusca no torque, isto torna o método menos eficaz quando comparado ao *CLF* mínimo.

O mérito de minimizar o *CLF* para alcançar as melhores condições de balanceamento está ilustrado na figura 4.2, na qual se confronta o método do CLF com o de torques máximo nos cursos ascendente e descendente.

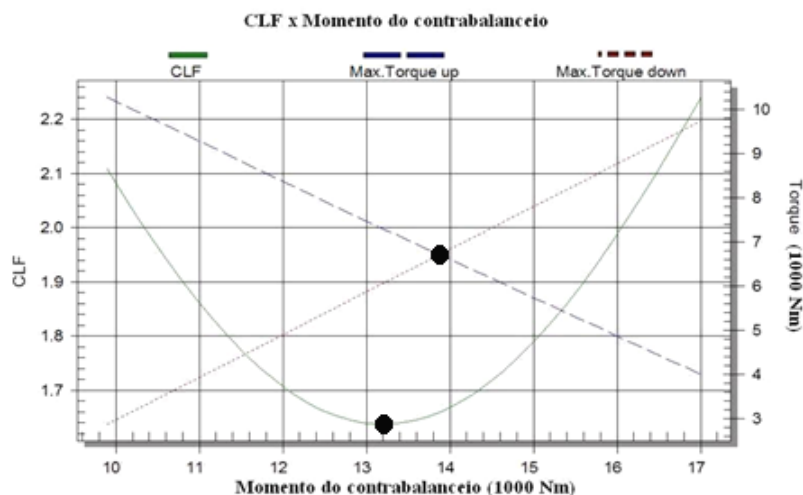


Figura 4.2: Programa - Métodos para determinação de M(TRIGGIA, 2010)

O comparativo mostra que pelo método CLF e torques máximos, as grandezas analisadas têm pequena diferença umas das outras, ou seja, praticamente não se teria grandes benefícios de uso de um em relação ao outro. Mas, o fato de se poder obter o CLF a partir de dados lidos de um inversor de frequência, torna o método do CLF mais fácil de ser aplicado, portanto, esta será a melhor opção para se contrabalancear a unidade de bombeio, sempre que o motor desta for acionada por inversor de frequência.

O programa utilizado é uma importante ferramenta de apoio aos estudos sobre balanceamento de UB. Ele pode gerar o gráfico representado na figura 4.2 e a tela ilustrada na figura 4.1, detalhes do programa se encontram descrito no apêndice B.

O próximo passo é facilitar a obtenção do CLF por meio da tensão no barramento DC de um inversor de frequência. Sendo este o principal objeto deste estudo.

## 5 Obtenção do CLF via Inversor de frequência - Barramento DC

O estudo sobre contrabalanceamento ideal das unidades de bombeio estaria esgotado em sua essência, se determinar o *CLF* fosse algo trivial e dispensasse o uso de dados obtidos por meio de sensores. Conhecer o *CLF* por meio de outra variável que não seja a carga no conjunto de hastes, corrente elétrica e posição, potencializaria a obtenção do fator de carga cíclica de maneira mais simples e rápida. Durante testes preliminares verificou-se que, em BM acionado por inversor de frequência, há possibilidade de se utilizar a tensão do Barramento de corrente contínua (DC) para obter o *CLF*.

Esta etapa do trabalho tem foco na análise do comportamento da corrente no motor, ou seja, da corrente na carga  $I_{RL}$  e da tensão no barramento DC de um inversor de frequência. A corrente varia devido à variação do torque requerido do motor. Este fenômeno produz uma variação na tensão do Barramento DC de um inversor de frequência. Para compreender como a corrente  $I_{RL}$  em um motor de indução sofre influência do torque mecânico produzido pela carga, pode-se consultar o apêndice B. O comportamento da tensão e corrente no Barramento DC do inversor de frequência será analisado com foco na determinação do *CLF*.

### 5.1 Inversor de Frequência

Segundo WEG (2009), inversores estáticos indiretos de frequência, com tensão imposta por PWM (*Pulse – Width – Modulation*), são atualmente os equipamentos mais empregados para a alimentação de motores de baixa tensão, nas aplicações industriais que requerem variação de velocidade. Estes operam como Inversores de frequência e tensão. Este sistema de acionamento opera entre a fonte de energia (rede elétrica) e o motor de indução. A figura 5.1 ilustra os principais estágios desse equipamento.

Para realizar seu papel, o Inversor de frequência conta com três estágios:



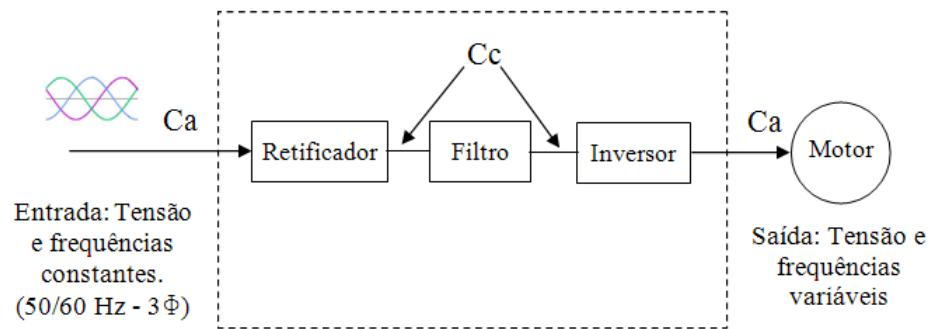


Figura 5.1: Esquema simplificado de um inversor de frequência (WEG, 2009, p.7)

- Retificador ou Ponte de diodos - Responsável pela retificação do sinal alternado, tensão e frequências constantes, provenientes da rede de alimentação.
- Filtro - Regulação da tensão do *Barramento\_DC* retificada com o armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores.
- Inversor - Transistores (*IGBT*) - Inversão da tensão contínua proveniente do *Barramento\_DC*, num sinal alternado, com tensão e frequências variáveis,

onde:

- $C_a$  : corrente alternada, ( $emV$ ).
- $C_c$  : *DC* - corrente contínua, ( $emV$ ).

### 5.1.1 Diagrama em Bloco de um Inversor

A figura 5.2 ilustra os estágios de um inversor de frequência com o objetivo de apresentá-lo e identificar em quais blocos se encontram as variáveis de interesse deste trabalho, visando a medição e o controle. No bloco de medição tem-se a intenção de reconhecer o comportamento da tensão no Barramento DC em função da variação do torque mecânico no motor, que aciona uma unidade de bombeio. O bloco de controle é analisado tendo como objetivo controlar a velocidade ou torque de um motor, e será objeto de detalhamento no capítulo 6.

O *Set – Point (SP)* diz respeito à referência de velocidade ou torque. Ou seja, recebe o *Set – point* com o valor desejado para uma dessas variáveis.

Geralmente, o controlador utilizado em inversor de frequência têm ações proporcional e integral (PI) e é utilizado para controlar velocidade ou torque. Este módulo recebe a referência SP, realiza o cálculo do erro e produz a alteração na sua saída, ou seja, na referência do módulo responsável por controlar fluxo e torque.

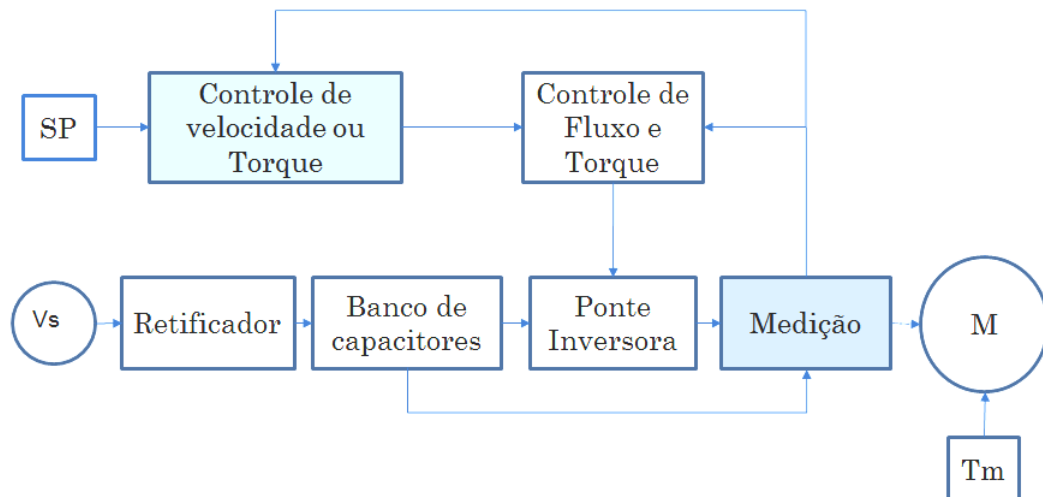


Figura 5.2: Diagrama em bloco - Inversor de frequência

O estágio de controle de fluxo e torque recebe a referência do módulo de controle de velocidade ou torque e gera pulsos com largura e frequência proporcionais a essa referência. Por meio da alteração na largura dos pulsos enviados ao bloco ponte inversora é possível controlar a duração, e conseqüentemente, a frequência de acionamento dos transistores que compõem essa ponte. Esta técnica é denominada como PWM (modulação por largura de pulsos, *Pulse – Width – Modulation*).

O bloco retificador recebe a tensão da rede elétrica e a retifica, transformando-a em uma tensão pulsante que alimenta um filtro.

O banco de capacitores age como um filtro passa-baixas frequências. Esse estágio é responsável por transformar a tensão pulsante em contínua, gerando, a energia potencial capaz de manter a tensão relativamente constante na sua saída, ou seja, no Barramento DC.

A ponte de transistores é alimentada pela tensão do banco de capacitores e recebe do controle de fluxo e torque os pulsos, e, faz os chaveamentos dos transistores da ponte. A largura e a frequência do chaveamento alteram o nível da tensão e frequência nos terminais do motor, controlando assim a potência e a velocidade do motor.

O bloco  $T_m$  representa o torque mecânico do sistema. Este torque se altera com a variação da potência exigida do eixo do rotor de um motor.

O módulo de medição é responsável por medir as tensões e correntes do sistema, também por inferir variáveis tais como velocidade, torque, etc. Relembrando, a principal variável que se pretende medir é a tensão DC no Barramento do banco de capacitores para obter o CLF.

### 5.1.2 Ponte Inversora Trifásica

O conjunto formado pela ponte de diodos retificadores, filtro (banco de capacitores) e ponte de transistores recebe o nome de ponte inversora. Estes dispositivos geralmente são utilizadas para acionar motores trifásicos com tensão alternada. A figura 5.3 ilustra a ponte inversora.

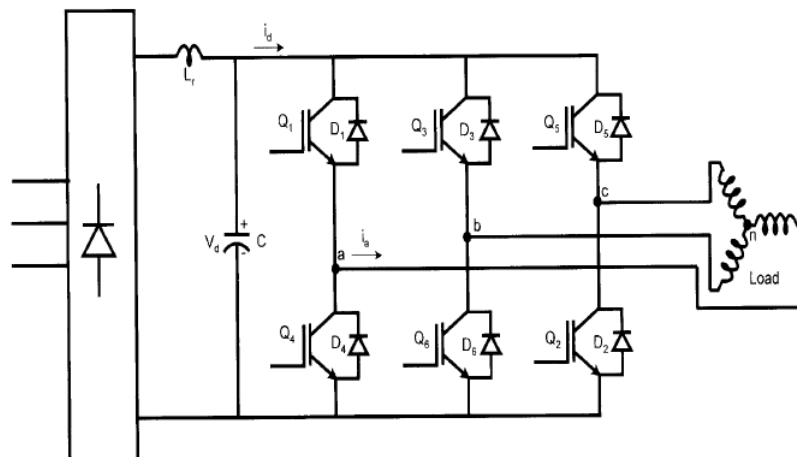


Figura 5.3: Ponte inversora trifásica (modificado)(K.ROSE, 2001, p.198)

As pontes inversoras trifásicas são comumente utilizadas para acionar motores AC. A figura 5.3 ilustra uma dessas pontes e a figura 5.4 apresenta um exemplo de onda quadrada, ou seis passos, produzidos durante a operação de uma ponte. O circuito consiste de três circuitos de meia-onda, tais quais são mutuamente chaveados em intervalos de  $\frac{2\pi}{3}rad$ , para gerar as ondas de tensão trifásica.

A tensão na entrada  $V_s$  aplicada na entrada da ponte pode ser monofásica ou trifásica, depois de retificada pela ponte de diodos é filtrada por meio de capacitores ou por um filtro formado por capacitores e indutores. A tensão na saída da ponte será uma onda quadrada, que pode ser medida em relação ao tap central da ligação estrela das bobinas do motor.

Estas ondas podem ser expressas pelas suas séries de Fourier. As equações 5.1, 5.2 e 5.3 representam estas séries:

$$V_{ao} = \frac{2V_d}{\pi} [\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots] \quad (5.1)$$

$$V_{bo} = \frac{2V_d}{\pi} [\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{3} \cos 3(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{5} \cos 5(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \dots] \quad (5.2)$$

$$V_{co} = \frac{2V_d}{\pi} [\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{3} \cos 3(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \dots] \quad (5.3)$$

Portanto as tensões entre fases podem ser obtidas, conforme abaixo:

$$V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \quad (5.4)$$

$$V_{ab} = \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} [\cos(\omega t + \frac{\pi}{6}) + 0 - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + \frac{\pi}{6}) + 0 - \frac{1}{7} \cos 7(\omega t + \frac{\pi}{6}) + \dots] \quad (5.5)$$

$$V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \quad (5.6)$$

$$V_{bc} = \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} [\cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 0 - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 0 - \frac{1}{7} \cos 7(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \dots] \quad (5.7)$$

$$V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \quad (5.8)$$

$$V_{ca} = \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} [\cos(\omega t + \frac{5\pi}{6}) + 0 - \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + \frac{5\pi}{6}) + 0 - \frac{1}{7} \cos 7(\omega t + \frac{5\pi}{6}) + \dots] \quad (5.9)$$

As formas de ondas ilustradas na figura 5.4 a, b, e c representam as tensões  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  e  $V_{co}$ . As tensões  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  estão representadas por d, e, f. Já a figura 5.4g representa as curvas de tensão e corrente  $V_{an}$  e  $I_a$  que circula entre a fase a e o neutro de um motor.

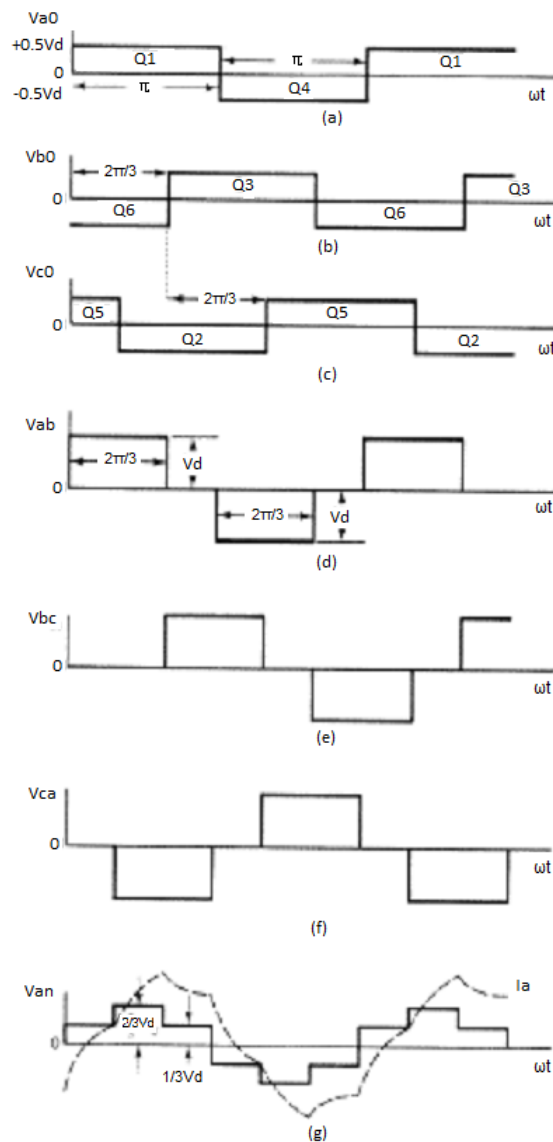


Figura 5.4: Tensão de Saída - Forma de onda quadrada(K.ROSE, 2001, p.199)

Portanto as tensões  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  e  $V_{cn}$  representam as tensões que alimentam uma carga trifásica ligada em estrela, podendo estas ser determinadas respectivamente por:

$$V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (5.10)$$

$$V_{bn} = \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (5.11)$$

$$V_{cn} = \frac{2}{3}V_{co} - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} \quad (5.12)$$

## 5.2 Variação da Tensão no Barramento DC

Um modelo simplificado do circuito de uma ponte inversora se encontra ilustrado na figura 5.5, (PARTYKA, 2008). Apesar de o modelo considerar a carga como puramente resistivo, este servirá como referência para construção de um novo modelo:

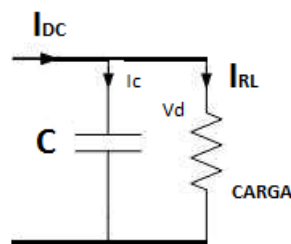


Figura 5.5: Modelo da tensão VD modificado (PARTYKA, 2008, p.18)

Sendo,

$$I_c = C \frac{dV_d}{dt} = i_{DC} - i_{RL} \quad (5.13)$$

Onde,

$I_c$  - Corrente no capacitor, em (A)

$C$  - Capacitância, em (F)

$V_d$  - Tensão no Barramento DC, em (V)

$i_{DC}$  - Corrente no Barramento DC, em (A)

e,

$$i_{RL} = \frac{V_d}{R_L} \quad (5.14)$$

Onde,

$i_{RL}$  - Corrente na carga, em (A);

$R_L$  - Carga resistiva, em ( $\Omega$ );

Sabe-se que, em motores de indução não são cargas puramente resistivas, podendo, este ser representado conforme figura 5.6. Esta ilustração mostra um circuito simplificado de uma fase de um motor trifásico.

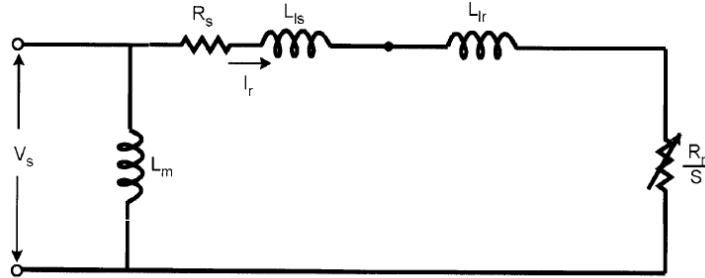


Figura 5.6: Circuito simplificado - Uma fase de um motor trifásico (K.ROSE, 2001, p.39)

Portanto, o módulo da corrente no rotor  $I_r$  é dada por:

$$I_{RL} = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + \omega_e(L_{is} + L_{ir})^2}} \quad (5.15)$$

Substituindo  $I_r$  da equação 5.15 em 5.13, tem-se:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i_{DC}}{C} - \frac{\frac{V_s}{C}}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + \omega_e(L_{is} + L_{ir})^2}} \quad (5.16)$$

Onde,

$C$  - Capacitância, em (F)

$V_d$  - Tensão no Barramento DC, em (V)

$i_{DC}$  - Corrente no Barramento DC, em (A)

$V_s$  - Tensão no bobinado, em (V)

$R_s$  - Resistência do bobinado, em ( $\Omega$ )

$R_r$  - Resistência do rotor, em ( $\Omega$ )

$S$  - Escorregamento, ADM

$L_{is}$  - Indutância do bobinado, em (H)

$L_{ir}$  - Indutância do rotor, em (H)

$\omega_e$  - Frequência no bobinado, em (Hz)

Integrando a equação 5.13 tem-se:

$$V_{dr} = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_{DC} dt - \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + \omega_e(L_{is} + L_{ir})^2}} dt \quad (5.17)$$

Observa-se na equação 5.17, que a variação da resistência rotórica  $R_r$  é produzida pela variação do escorregamento ( $S$ ). Este efeito faz com que a corrente  $I_r$  também varie. Sendo  $V_d = V_{dr}$ .

A tensão  $V_s$  corresponde a uma das tensões,  $V_{an}$  prevista na equação 5.10 ou  $V_{bn}$  ou  $V_{cn}$  de um motor ligado em estrela.

Independente do fato destas tensões sofrerem influência do escorregamento, a carga ora requisita potência, quando a máquina indutiva em questão se comporta como motor, ora devolve energia para o barramento, como um gerador. A análise da tensão no barramento dirá se a máquina de indução em questão está operando como motor ou gerador.

### 5.2.1 Máquina de Indução - Modo Motor e Regenerativo

Um inversor fornece ao motor uma tensão eficaz, e isto ocorre porque ele opera entre os modos inversor ou motor, como mostra a figura 5.7. A fase de corrente  $i_a$  assume filtragem perfeita quando o ângulo  $\phi = \frac{\pi}{3}$ . Na primeira fase tem-se o ciclo de tensão positivo, no entanto, a corrente é negativa e o diodo D1 conduz, tem-se este retorno para a fonte. No próximo segmento o IGBT - Q1 entra em condução e leva energia para a carga. O próximo semi-ciclo é simétrico D4 e Q4, respectivamente, repetem as operações, isto também pode ser verificado na figura 5.7. Em cargas puramente resistivas o ângulo  $\phi = 0$  e cada IGBT conduz por  $\pi$  rad.

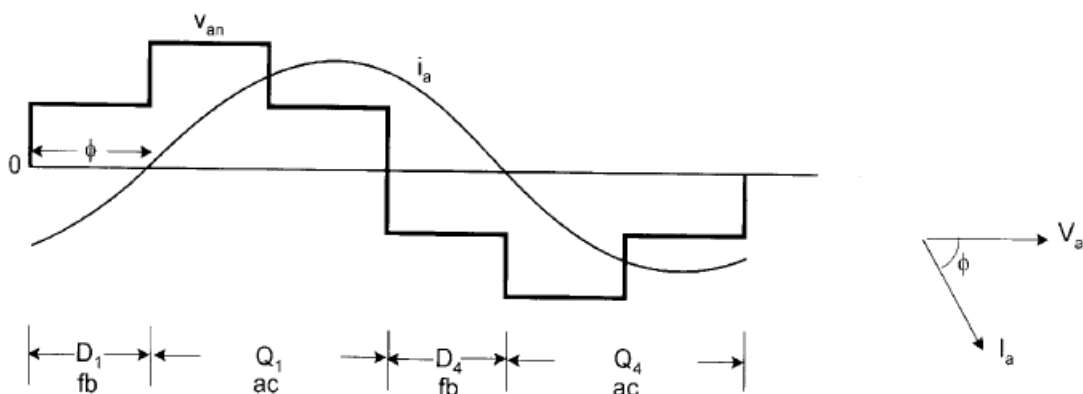


Figura 5.7: Forma de onda no modo - Motor (modificado)(K.ROSE, 2001, p.201)

Na figura 5.8 tem-se o inversor operando no modo de retificação e, o motor, na regeneração.

Na ilustração tem-se apresentada uma forma de onda no modo de regeneração com



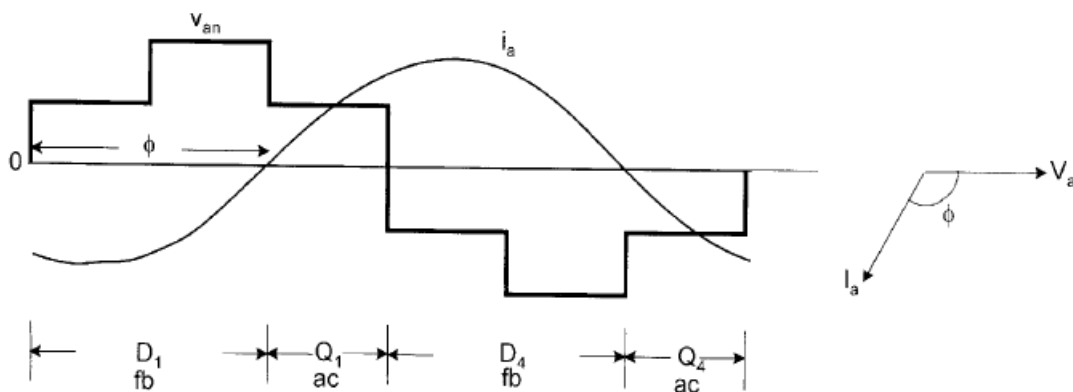


Figura 5.8: Forma de onda no modo - Regeneração (modificado)(K.ROSE, 2001, p.201)

$\phi = \frac{2\pi}{3}$ , indicando que o retorno de tensão do motor para dentro do inversor é bem alto. Na condição extrema, se  $\phi = \pi$ , o inversor opera apenas com os diodos.

A tensão no barramento DC, tendo como referência o primeiro harmônico, pode ser dada por:

$$V_{dr} = \frac{4V_d}{\pi} \sin \frac{\phi}{2} \quad (5.18)$$

Onde,

$V_{dr}$  - Tensão regenerada DC, em (V)

$V_d$  - Tensão no barramento DC, em (V)

$\phi$  - Defasagem entre corrente e tensão, em (rad)

Por fim, se tem que a defasagem entre tensão e corrente depende exclusivamente do escorregamento do sistema. Ou seja, se a velocidade entre estator e rotor for síncrona, então, a defasagem entre tensão e corrente é igual a zero. Como consequência se tem a tensão no barramento constante e o CLF = 1. No entanto, isto não é uma realidade de cargas que flutuam. Diante disso, o CLF será obtido em função da variação da tensão no barramento DC visando atender o primeiro objetivo proposto neste trabalho.

### 5.3 Generalidades Sobre Curva de Torque de um Motor de Indução

Um curva de torque típica de um motor de indução está representada pela figura 5.9, o comportamento do torque versus a relação de frequência do estator e rotor será descrito

na próxima seção, com foco em aplicações que utilizam inversores de frequência.

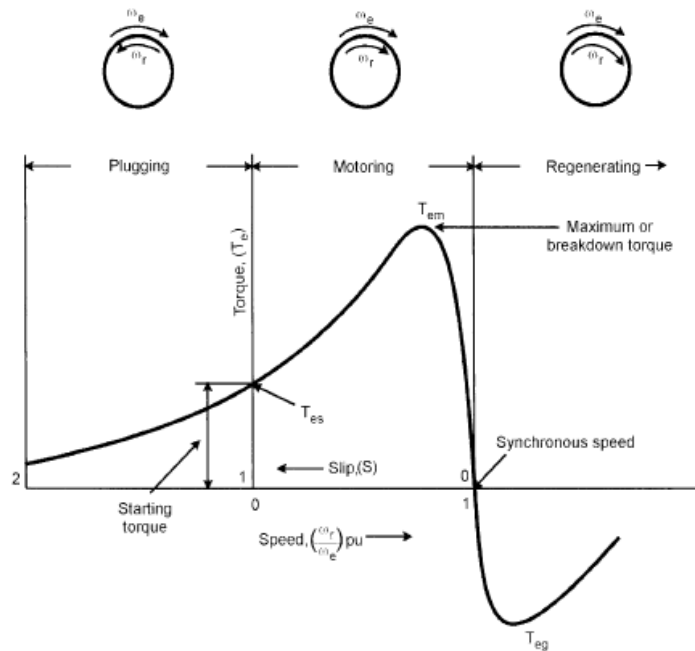


Figura 5.9: Curva de torque de um motor de indução (K.ROSE, 2001, p.40)

## 5.4 Determinação do CLF - Barramento DC

No manual sobre inversores de frequência WEG (2009), se tem uma relação entre o valor da tensão  $V_d$  com o torque requerido pela carga. Ou seja, quando motor opera em vazio ou com carga leve sua tensão tende a estabilizar no valor igual a:

$$V_{dr} = \sqrt{2} * V_{rede} \quad (5.19)$$

Quando, porém, o motor está em carga mais elevada (por exemplo, plena carga) a tensão no  $V_d$  tende a:

$$V_{dr} = \frac{2}{3} \sqrt{2} * V_{rede} \quad (5.20)$$

Onde,

$V_{dr}$  - Tensão regenerada DC, em (V)

$V_{rede}$  - Tensão da rede trifásica, em (V)

Outra situação comum em cargas alimentadas por Inversor de frequência é a elevação do valor da tensão  $V_d$ , quando a carga devolve parte da energia para o Inversor na forma de

energia regenerada. Isto ocorre principalmente em sistemas com cargas desbalanceadas, em que ora a carga requer energia do motor, quando o escorregamento é menor que um e maior que zero e o torque líquido é positivo, vide figura 5.9. Outra situação é comum quando, a carga requer menos energia do motor, ou seja, o escorregamento é menor que zero, o torque líquido fica negativo, devolvendo parte da energia para o barramento e elevando o valor de sua tensão. Portanto é possível correlacioná-la ao fator de carga mecânica do sistema e defini-la por meio desta tensão. Logo, se conhecendo o valor da tensão no  $V_d$  também é possível inferir o  $CLF$  de uma carga mecânica.

Consegue-se, assim, simplificar a determinação do CLF em sistemas equipados com inversores de frequência. Para tanto, foi levado em consideração a variação da tensão no Barramento DC, possível, explorando-se a relação proposta na equação 5.17. Com isto, a corrente utilizada para determinar o CLF foi substituída pela tensão  $V_{dr}$  dando origem à nova função, representada pela equação 5.21. Esta função correlaciona os valores eficazes e médios, calculados a partir da tensão do (barramento DC) de um Inversor de frequência. Esta tensão tem seu valor inversamente proporcional a corrente. Para obter fator de carga cíclica, tem-se:

$$CLF = \frac{\sqrt{\int_{\theta=0}^{2\pi} \left[ \frac{1}{V_{dr}}(\theta) \right]^2 d\theta}}{\int_{\theta=0}^{2\pi} \left[ \frac{1}{V_{dr}}(\theta) \right] d\theta} \quad (5.21)$$

Onde,

$CLF$  : Cyclic Load Fator - em (adm);

$V_{dr}$  : Tensão regenerada no barramento DC, em (V);

$\theta$  - Ângulo da manivela, em (rad)

A posição da manivela  $\theta$  pode ser definida em função do período de um ciclo de bombeio, logo:

$$\theta = \omega t \quad (5.22)$$

Onde,

$\theta$  - Ângulo da manivela, em (rad)

$\omega$  - velocidade angular, em (rad/s)

t - Tempo, em (s)

Essencialmente, neste capítulo o CLF foi definido em função da tensão no barramento DC de um inversor de frequência. Uma das vantagens que poderá se verificar ao aplicar o método, diz respeito à possibilidade de dispensar o uso de sensores externos para medir força ou deslocamento. Outro fator de impacto importante diz respeito à facilidade de aplicação dele em sistemas de bombeio mecânicos equipados com inversores de frequência. Para validar o modelo matemático apresentado para determinar o CLF, o comportamento desta tensão será avaliado em um inversor que alimenta o motor de uma unidade de bombeio operando sob as condições desbalanceadas e balanceadas.

## **6 Balanceamento do BM com um Inversor de Frequência**

Este capítulo visa identificar o desbalanceamento por meio da análise espectral do sinal de tensão do barramento DC de um inversor de frequência. Também será verificada a correlação entre o CLF de uma unidade bombeio e esta tensão. Para isto, foi necessário realizar um estudo de caso, onde foi analisada uma unidade de bombeio desbalanceada e balanceada. A infraestrutura laboratorial utilizada para realização deste estudo foi a do LEA.

Para certificar-se que há uma correlação definida entre o CLF de uma unidade bombeio e o valor da tensão no barramento DC de um inversor de frequência, foi necessário realizar alguns experimentos com este conjunto. Neste sentido, o sistema inversor-UB foi analisado com o objetivo de identificar a relação entre a variação da carga e a tensão no barramento DC de um inversor de frequência.

Uma estratégia de balanceamento ideal de uma unidade de bombeio é apresentada, ela também se baseia na tensão do barramento DC. Os resultados obtidos mostram que é possível reduzir a variação do torque solicitado pelo BM, variando a frequência de acionamento do motor da UB e, conseqüentemente, a sua velocidade.

### **6.1 Generalidades de Sistemas Desbalanceados**

O desbalanceamento é ocasionado devido à distribuição irregular das massas em relação a um eixo de inércia (PACHECO, 2007). De acordo com NSK (2004), desbalanceamento são vibrações elevadas na direção radial, com predominância da componente em  $1N$  ( $N$  frequência de rotação do equipamento). Segundo Sá (2000), o espectro de vibração de um componente desbalanceado apresenta alta amplitude no primeiro harmônico, que crescerá com o quadrado da velocidade, podendo ocasionar elevadas vibrações nas direções axiais e radiais.

## 6.2 Tensão no Barramento DC - Sistema Desbalanceado

A figura 6.1 ilustra a variação de tensão em uma unidade de bombeio desbalanceada, onde a tensão máxima ultrapassa o valor previsto na equação 5.19, definida como tensão de referência para sistemas balanceados. Também foi possível verificar que o limite mínimo previsto na equação 5.20, que ocorre a plena carga, não foi ultrapassado. Com isto, tem-se que a tensão no barramento sofre influência devida à variação da carga, que provoca uma alteração diretamente proporcional no torque exigido do redutor da UB.

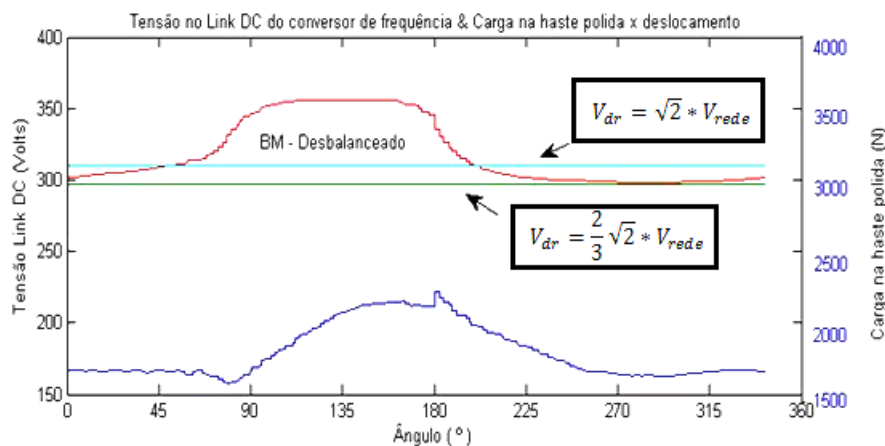


Figura 6.1: Tensão no barramento DC e carga na haste polida *versus* deslocamento

As análises a seguir tratam da relação entre o valor da tensão barramento DC e a variação de carga na haste polida. Durante as verificações foi possível constatar que esta tensão é elevada durante o curso ascendente da haste polida e decai no descendente. Isto pode ser facilmente verificado observando-se a figura 6.1. A tensão eficaz no barramento corresponde a valores previstos na equação 5.19. E valores de tensão ao longo do curso variam com valores acima e abaixo deste valor de tensão. É possível, assim, correlacionar os valores de tensão medidos com a tensão eficaz calculada, e obter a curva de variação de carga mecânica na UB. Observa-se que a tensão no barramento DC varia inversamente com o torque requerido do redutor da UB.

Para validar o modelo que representa o CLF conforme apresentado no capítulo anterior, representado pela equação 5.21 foi necessário avaliar um bombeio mecânico acionado por um inversor de frequência, sob duas perspectivas. A primeira, com uma unidade de bombeio operando sobre condições de desbalanceamento, onde a finalidade é identificar o valor máximo da tensão no barramento DC e a trajetória de subida e descida desta tensão, depois correlacionar os valores medidos com o valor do CLF durante o ciclo de bombeio.

A segunda abordagem servirá para identificar o nível de variação do valor da tensão no barramento DC com a unidade de bombeio balanceada.

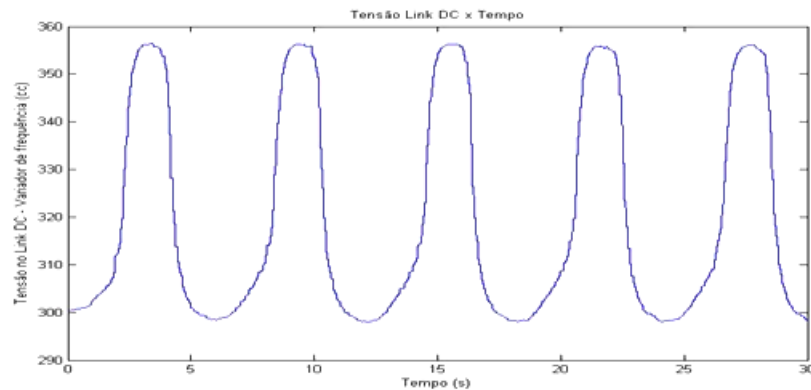


Figura 6.2: Tensão no barramento DC com UB desbalanceada

A figura 6.2 representa a medição dos valores da tensão no barramento DC em função do tempo. A medição desta grandeza foi feita em um conjunto inversor-UB operando sob a condição de desbalanceamento. Para identificar este fenômeno foi necessário utilizar transformada rápida de Fourier. Por meio deste recurso foi possível gerar o espectro potência em função da frequência em ambiente MatLab. O programa que possibilitou isto se encontra descrito no apêndice E.

Na figura 6.3, tem-se as amostras utilizadas no cálculo do espectro de potência.

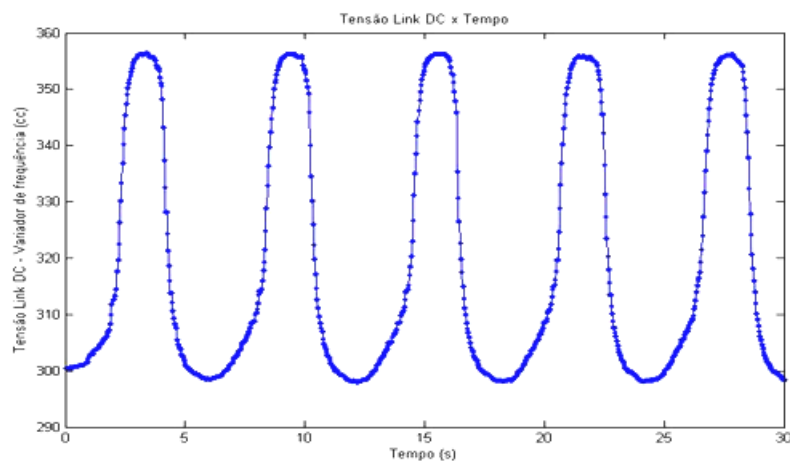


Figura 6.3: Pontos da curva da tensão no barramento DC com uma UB desbalanceada

Após aplicar a transformada rápida de Fourier, se obteve vetores de coeficientes complexos, conforme 6.4. O valor absoluto desses coeficientes foi usado para obter o espectro de densidade de potência pela relação derivada do teorema de Parseval,  $P(W) =$

$|V_{dc}(W)|^2$ . Ou seja, a densidade espectral de potência é igual ao quadrado da magnitude do espectro de frequência, figura 6.5. É importante observar que os valores obtidos não estão em escala nem possuem unidade de medida definida, pois dependem do número de amostras e do período de amostragem, porém isso não prejudica a análise.

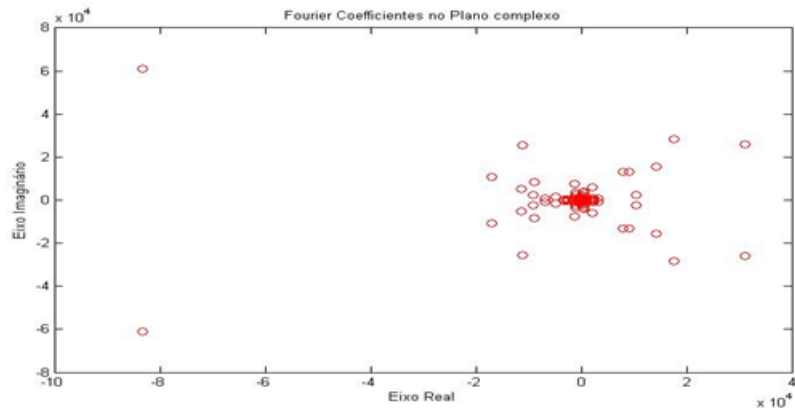


Figura 6.4: Coeficientes de Fourier no plano complexo

Para construir esta relação é preciso obter a magnitude quadrática dos valores dos coeficientes e a frequência de operação da UB. Isto é obtido por meio do número de pontos que representam a amostra, e a amplitude (potência do sinal), que é dada pelo quadrado do valor absoluto dos coeficientes. A frequência é obtida em função do número de amostra e deve respeitar a frequência de Nyquist, conforme descrito no apêndice E.

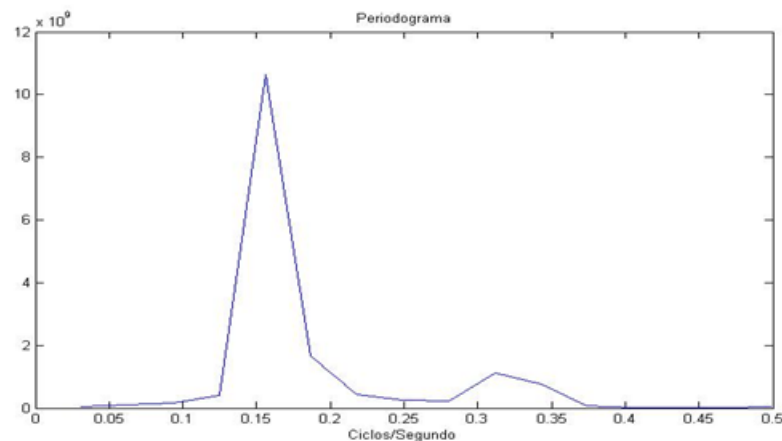


Figura 6.5: Espectro de potência do sinal *versus* frequência

Finalmente, acha-se a duração do ciclo, um pouco mais precisamente, escolhendo a frequência de maior densidade de potência. O ponto localiza esse ponto na figura 6.6.

Como o período é bem definido e, este corresponde ao mesmo período de operação



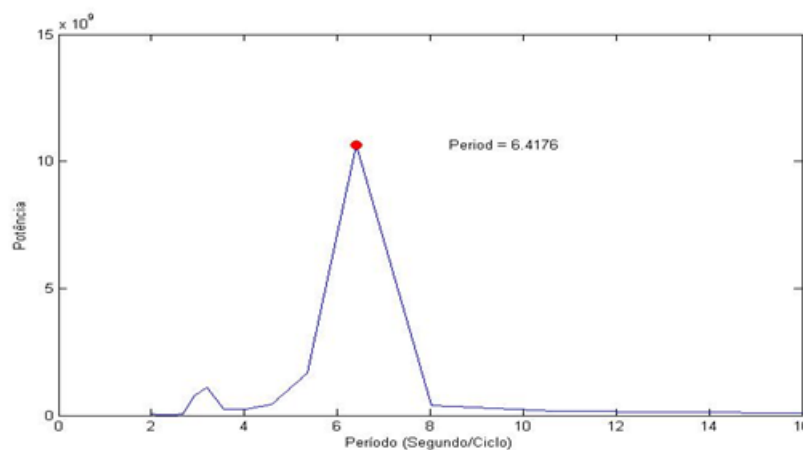


Figura 6.6: Espectro de potência do sinal *versus* período

da UB, consegue-se, que por meio da medição da tensão no barramento DC monitorar o nível de desbalanceamento da mesma. Isto é possível porque o desbalanceamento é um fenômeno que se manifesta (ou comporta) com uma frequência igual à frequência de operação da máquina, ou seja, aparece no primeiro harmônico do espectro de energia.

### 6.3 CLF em Função da Tensão no Barramento DC

Os valores de tensão do barramento DC analisados nas seções anteriores, de uma UB desbalanceada, foram submetidos à equação 5.21, e foi obtido um valor de  $CLF=1,054$ . Na figura 6.7 pode-se analisar o comportamento da tensão em uma UB desbalanceada, durante um ciclo de operação. A linha tracejada representa a razão entre o inverso da tensão instantânea e a média do inverso da tensão. É importante analisar esta razão, pois quanto maior a variação em torno do 1, maior será o desbalanceamento da unidade. Em condições ideais de balanceamento essa razão seria constante e igual a 1. Essa razão possuirá valores maiores que 1 entre o final do curso ascendente até o final do curso descendente, que é quando a frequência na saída do rotor fica menor que a frequência no bobinado do motor, ou seja, o escorregamento do motor é maior que zero.

Quando a tensão no barramento DC tende à tensão prevista para sistema em plena carga, obtida com a equação 5.20, essa razão possui valor máximo e maior que 1, pois a tensão do barramento DC tende ao mínimo. Isto ocorre no meio do curso descendente, como pode ser verificado na figura 6.7.

Do meio para o final do curso descendente a tensão no barramento DC sobe à medida

que a velocidade na saída do redutor aumenta. O valor da razão será maior que 1 até que a velocidade imposta pela carga e contrapesos ao eixo do rotor do motor, seja maior que a velocidade do campo girante do motor, passando então a ter valores menor que 1. Isso acontece entre o início e o meio do curso ascendente. Com isto, a tensão no barramento DC elevar-se-á valores superiores à tensão de operação a vazio, obtida na equação 5.19 .

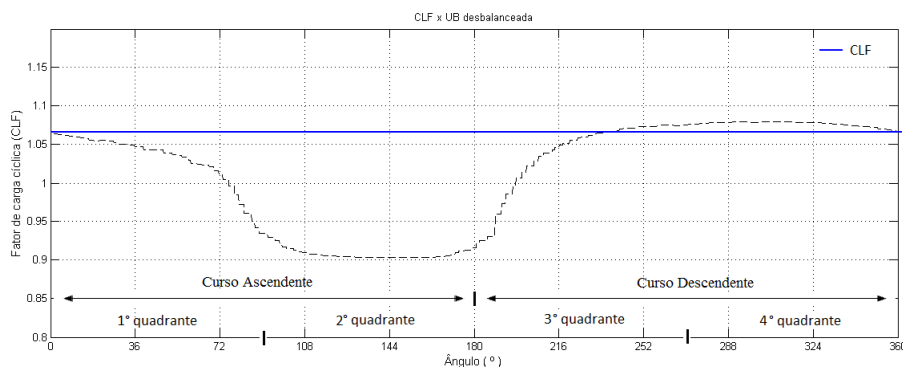


Figura 6.7: CLF e razão inverso da tensão instantânea / média do inverso da tensão *versus* deslocamento com uma UB desbalanceada

Portanto, quanto maior o desbalanceamento, maior será a componente do espectro de potência com frequência igual à frequência de operação da UB. Consegue-se, assim, utilizar a análise do espectro de potência de um sinal lido da tensão no barramento DC de um inversor de frequência e identificar condições de desbalanceamento em um sistema de bombeio mecânico. Além disso, o fator de carga cíclica pode ser obtido por meio desta variável. Para que este modelo se mostre útil no dia-a-dia, objetiva-se que o valor do CLF seja mínimo.

## 6.4 Análise do CLF em Função da Tensão no Barramento DC Após Balanceamento

Foi feito o balanceamento da unidade de bombeio ajustando-se os contrapesos na posição ideal. Sob condições balanceadas o comportamento da tensão no barramento DC se mostra com menos variação e próxima da tensão de operação a vazio, assim a razão entre o inverso da tensão instantânea e a média do inverso da tensão fica próxima de 1 durante todo o ciclo, como mostra a figura 6.8. Portanto, quanto mais equilibrada a relação de carga no BM, entre a carga na haste polida e efeito de contrabalanceamento, mais próximo da tensão de operação a vazio estará da tensão no barramento DC do inversor. Sob esta condição foi obtido o valor do fator de carga cíclica - CLF = 1,006.

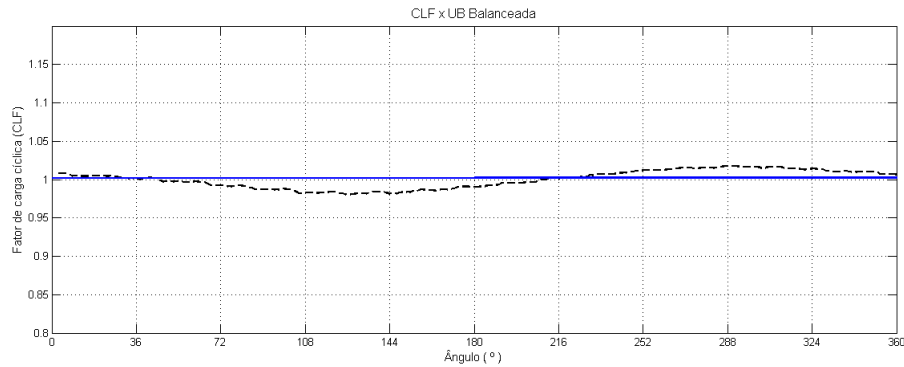


Figura 6.8: CLF *versus* deslocamento com uma UB balanceada

Ajustando-se a posição dos contrapesos até atingir o valor do  $CLF=1$  se teria o contrabalanceamento ideal. Isto ocorreria se o balanço entre a carga na haste polida e o efeito pudesse ser ideal, levando ao equilíbrio do sistema. No entanto, conforme discutido no capítulo 3, este equilíbrio é relativo. Estes ocorrem em apenas dois momentos, e, podem ser verificados nos primeiros e terceiros quadrantes das figuras 6.7 e 6.8.

Para atingir o contrabalanceamento ideal da UB, ajustar a posição dos contrapesos é a primeira e mais importante ação a ser adotada. Ou seja, após realizar os ajustes na posição dos contrapesos, reduz-se a variação da tensão no barramento DC e, quanto mais próximo o CLF estiver do valor 1 (referência de sistema balanceado) melhor balanceado estará o sistema. Para obter um balanceamento ainda melhor, apesar do balanceamento até então já ser considerado qualitativamente bom, pode-se usar uma técnica em complemento a primeira. Esta segunda técnica visa controlar a tensão do barramento (variável de controle) utilizando o *set – point* de frequência do inversor como variável manipulada. Isto é possível pela implantação do controlador apresentado a seguir.

## 6.5 Controle da Tensão do Barramento DC de um Inversor de Frequência que Aciona o Motor de um BM

Este tópico introduz o sistema desenvolvido para o controle de tensão de barramento DC para Unidade de Bombeio acionadas por inversores de frequência, com o objetivo de reduzir a variabilidade da tensão no barramento DC e, por consequência, reduzir a variação do momento de torque exigido do redutor. Com isto, é possível obter o balanceamento ideal do BM. Uma importante análise que será feita diz respeito ao consumo de energia, visando a sua redução.

A figura 6.9 apresenta o diagrama em blocos do sistema a controlar, onde o inversor de frequência foi dividido em blocos de potência, controle e medição. Este recebe alimentação de uma fonte de energia trifásica com tensão alternada, com amplitude e frequência constantes, e fornece energia, tensão e frequência variáveis ao motor. O controlador sugerido visa controlar a tensão de barramento DC (indicada na figura como variável de processo, PV) que pode ser lida através do módulo de medição. O *set – point* do controlador de tensão DC foi definido como a média aritmética da tensão, enquanto o controlador está desligado. E o controlador manipula a referência de frequência (indicada na figura como variável manipulada, MV) que é utilizada pelo controlador de velocidade embarcado no próprio inversor. É importante observar que existem dois controladores em cascata: o controlador de velocidade do inversor e o controlador da tensão no barramento DC proposto nesse trabalho. É importante também observar que o último foi implementado em um CLP e não internamente ao inversor.

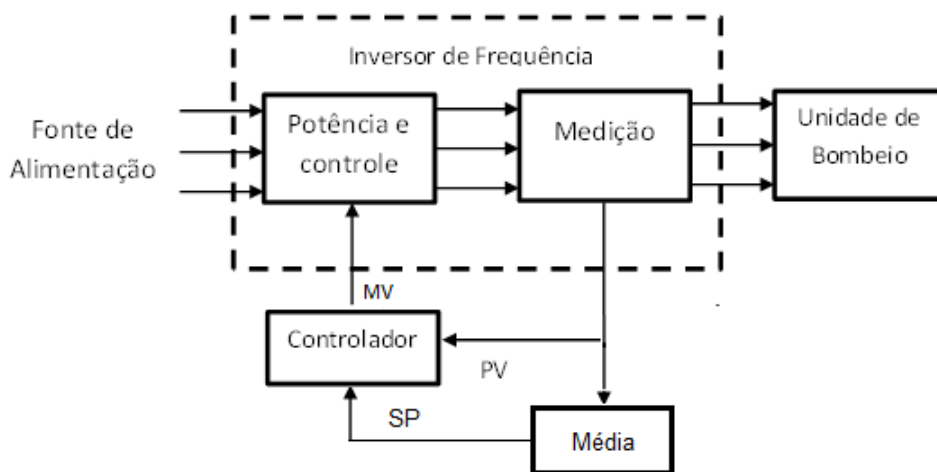


Figura 6.9: Diagrama em bloco do sistema a controlar

A figura 6.10 ilustra o sistema de controle na forma de blocos. Além das partes e variáveis já explicitadas, se tem um controle de saturação. Na implantação do projeto, devem-se respeitar as limitações mecânicas do sistema, limitando a ação do controlador. Optou-se por se utilizar um controle de saturação (*Anti Wind – Up*) com o objetivo de evitar que a unidade de bombeio ultrapasse os seus limites de operação.

A ideia de projetar um controlador dentro dos preceitos acadêmicos foi realizada com adaptações. Ou seja, foram utilizados recursos do senso comum do ambiente industrial, estes recursos foram utilizados em função da falta de expertise por parte do autor na identificação de processos não lineares. Diante disso, esta etapa objetiva definir o tipo de

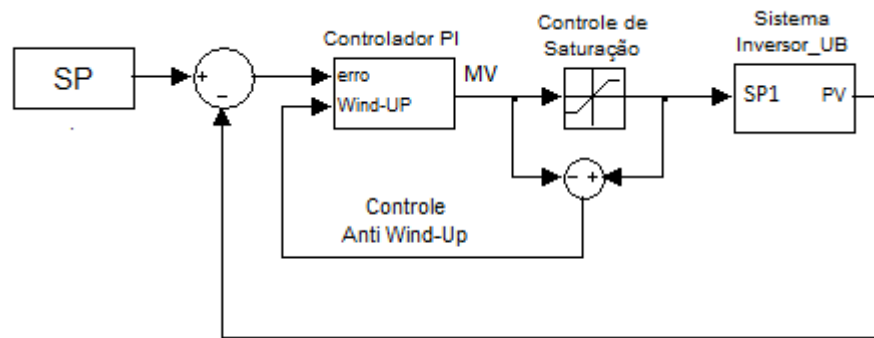


Figura 6.10: Diagrama de blocos para o controle VSD utilizando a tensão no barramento DC

ação de controle e os parâmetros do controlador seguindo um método heurístico. O critério de validação do projeto foi uma métrica definida pelo próprio autor. Definiu-se como meta reduzir a variação da tensão do barramento DC em no mínimo 30% e o tipo de controlador escolhido foi o controlador PI (proporcional integral) que é um controlador clássico, de bom desempenho e com tradição na literatura. Para sintonia optou-se pelo método tentativa e erro, que é um método prático e também bastante utilizado na indústria.

## 6.6 Parâmetros do Controlador

O propósito do controlador é rejeitar as perturbações na tensão de barramento causado pelo desbalanceamento. Números concretos como atenuação mínima da perturbação, velocidade, *overshoot* máximo são critérios que poderiam ser utilizados em um projeto. Para este controle a métrica de validação do sistema foi redução da porcentagem de variabilidade. Em uma malha de controle, pode-se avaliar esta variação tendo como base a variável de processo ou erro, desta forma:

$$\text{Variabilidade} = \frac{2\sigma}{\mu} \quad (6.1)$$

Onde,

$\sigma$  : Desvio Padrão (da PV ou do erro);

$\mu$ : Média (da PV ou do erro).

Para a sintonia do controlador foi considerada a frequência de acionamento (velocidade) da UB como entrada e, a saída, a tensão no barramento DC. Em malha fechada,

altera-se a rotação da UB, dentro dos limites de velocidade, com o propósito de obter a curva resposta para sintonizar o controlador. O limite de operação deverá ficar dentro dos limites construtivos, portanto, a UB não poderá ultrapassar o limite mínimo de 5 cpm (para lubrificação mínima do redutor) e máxima de 10cpm (torque máximo suportado pela coluna de hastes).

O controlador utilizado será do tipo PI devido a sua facilidade de implantação e se adaptar bem a maioria das aplicações industriais. A função de transferência do controlador PI é dada por:

$$u(s) = Kp\left(\frac{T_i s + 1}{T_i s}\right).e(s) \quad (6.2)$$

### 6.6.1 Controle de Saturação

Observa-se na Figura 6.10 que é adicionado um bloco de controle de saturação entre a saída do controlador e a entrada do sistema, este visa manter a operação dentro dos limites da velocidade de bombeio da UB que, neste caso, não deve ser inferior a 5cpm nem superior a 10cpm. Devido a esta limitação, o projeto requer um cuidado na implementação do algoritmo em relação a porção integral do controle, denominado *wind – up* da ação integral. Segundo Ordoñez (2003), quando o sinal de controle é saturado (atinge os valores limites mínimo ou máximo), a malha de realimentação é de certa forma interrompida, já que para o controlador consta o cálculo do sinal de controle sem saturação, mas para o processo, o sinal recebido é o saturado, e assim, de alguma forma é necessário informar isto ao controlador. A ideia principal é opor-se ao carregamento do integrador quando ocorre a saturação realimentando a saturação sobre a porção integral do controlador. Logo, utiliza-se um controle *anti – wind – up* com objetivo de melhorar o desempenho do controlador.

### 6.6.2 Definição da Tensão DC de Referência

A tensão de referência do sistema é dada em função da média de um número de amostras de tensão do barramento DC, enquanto o controlador estiver desligado. Desta forma se tem o referencial do inversor de frequência, conforme abaixo:

$$SP = \frac{\sum_{i=1}^m Tensao\_no\_barramento\_DC_i}{m} \quad (6.3)$$

Onde,

$m$  : número de amostras ;

## 6.7 Implementação no CLP

Para implementação do sistema foi necessário contar com um controlador lógico programável, cujo programa desenvolvido se encontra descrito no apêndice F.

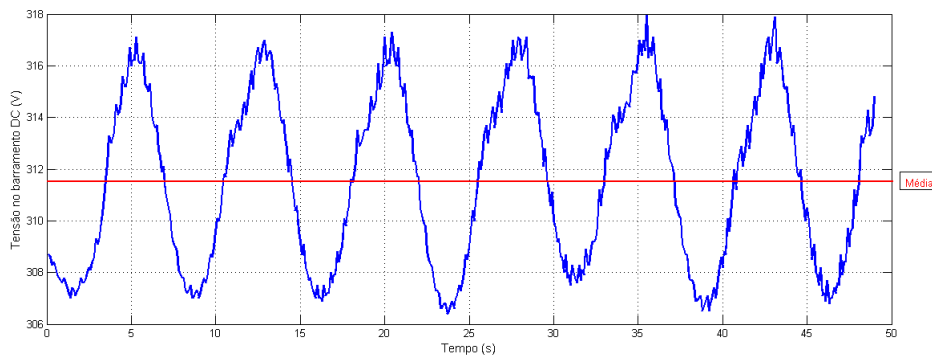


Figura 6.11: Tensão no barramento DC, sem controle

A implantação do controlador foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu em definir a variabilidade da tensão no barramento DC do inversor, nos cálculos dos ganhos  $K_p$  e  $K_I$ . Na fase seguinte, o controlador foi configurado e validado no processo, com os ganhos ajustados e a planta submetida a testes.

Inicialmente foi analisado o comportamento da tensão no barramento e da corrente na saída do inversor de frequência sem a implantação do controlador. A tensão está representada na figura 6.11.

A variação da tensão também foi quantificada, obtendo-se desvio padrão  $\sigma = 3,34V$ , média  $\mu = 311,50V$  e variabilidade de 0,021. A variação em torno da média está representada na figura 6.12 .

O comportamento da corrente na saída do inversor pode ser visto na figura 6.13.

A variação da corrente foi quantificada, obtendo-se desvio padrão de  $\sigma = 0,31A$ , a média  $\mu = 8,91A$  a variabilidade da corrente é de 0,0705. A figura 6.14 representa a

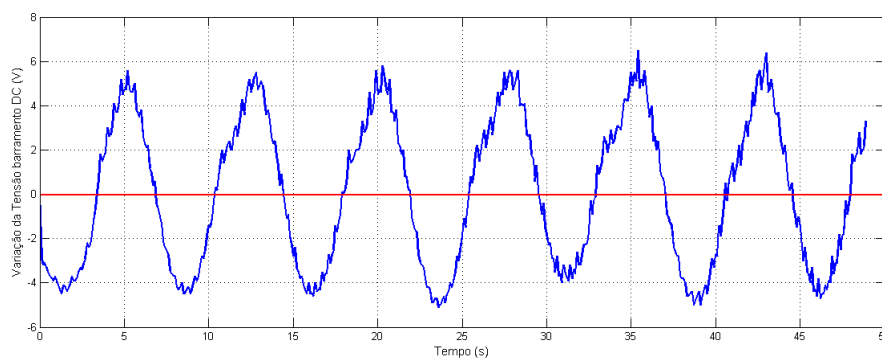


Figura 6.12: Variação da tensão em torno da média no barramento DC, sem controle

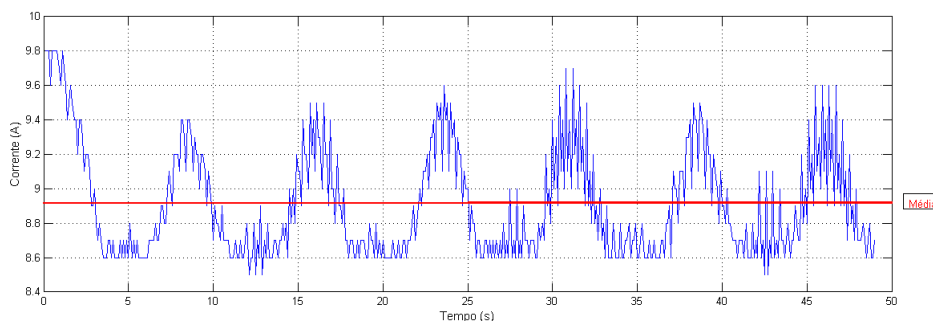


Figura 6.13: Corrente na saída do inversor, sem controle

variação em torno da média.

A primeira estratégia adotada para sintonia da planta se baseou no método de malha fechada de Ziegler Nichols, sendo, definidos a razão de queda em  $1/4$  do *overshoot* e o período de oscilação. A partir desses dados foram obtidos os ganhos. Como os resultados obtidos, vide tabela 6.1, não foram satisfatórios optou-se por ajustar os ganhos do controlador, tendo como base a experiência do autor. Os ganhos foram obtidos empiricamente, sendo eles ajustados na proporção de um pra cinco. Inicialmente o ganho  $K_p$  foi ajustado para 50 e ganho  $K_i$  para 250. Estes valores foram dobrados e depois triplicados. Após isto, se tem que a meta de obter a variabilidade da tensão do barramento DC foi atingida. A variabilidade foi reduzida em mais de 30% atendendo ao respectivo requisito de projeto do controlador.

A referida tabela apresenta um comparativo, contendo, ganhos  $K_p$ ,  $K_i$ , média e variabilidade da tensão no barramento DC utilizando as duas estratégias de sintonia.

Após a implantação do controlador, a figura 6.15 ilustra a variação da tensão, sendo o desvio padrão  $\sigma = 1,67V$ , a média  $\mu = 311,7V$  e a variabilidade da tensão 0,0107.



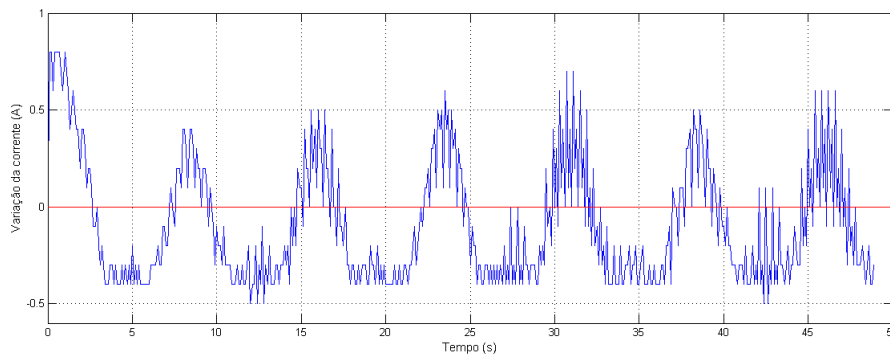


Figura 6.14: Variação da corrente em torno da média na saída do inversor, sem controle

Tabela 6.1: Parâmetros do controlador

Sintonia	$K_p$	$K_i$	Média (SP)	Variabilidade
Sem Controle	—	—	311,5V	0.0214
Ziegler Nichols	0,3	16	311,1V	0.0232
Autor	150	750	311,7V	0.0107

E a variação da corrente foi quantificada novamente, e observou-se que o desvio padrão reduziu para  $\sigma = 0,17A$ , a média se manteve em  $\mu = 8,79A$  a variabilidade da corrente foi de 0,0390. A figura 6.16 ilustra esta a variabilidade com o controlador ligado.

Finalmente, ao comparar a variabilidade do sistema sem e com controle, se verifica uma redução na variação da tensão no barramento DC de 50%. Na corrente esta redução foi maior que 45%. Portanto, o objetivo de reduzir-se-á variabilidade da tensão no barramento DC em 30% foi alcançada.

## 6.8 Síntese dos Resultados

A estratégia de controle desenvolvida foi bem sucedida em reduzir a variabilidade da tensão no barramento DC de um variador de frequência, por meio do controle da tensão no barramento DC manipulando a frequência (velocidade da UB). Além disso, tem-se que a variação na corrente de saída do inversor de frequência que alimenta uma UB também é reduzida. As reduções na variação da tensão contribuíram para o balanceamento ótimo da UB. Enquanto que a redução na variação da corrente pode reduzir as perdas por efeito Joule.

A evolução do sistema proposto pode ser verificado por meio da tabela 6.2. Ao com-

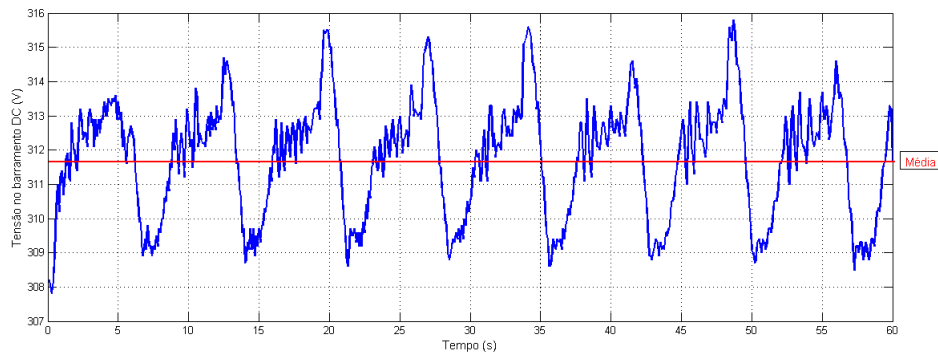


Figura 6.15: Variação da tensão em torno da média no barramento DC com controle

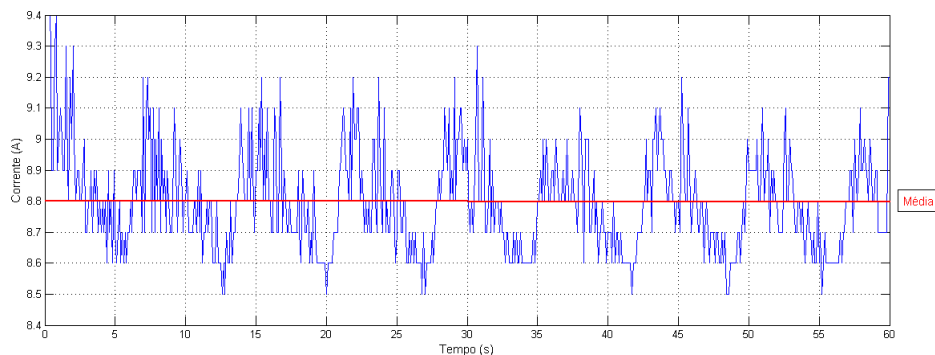


Figura 6.16: Variação da corrente em torno da média na saída do inversor com controle

para a variabilidade da tensão no barramento DC, entre a unidade de bombeio desbalanceada e balanceada com VSD, se observa uma redução na variação de 1340%. Este é benefício se dá em função da redução na variação de torque.

A variação da corrente foi reduzida em 330%, esta informação pode ser verificada por meio da tabela 6.3. A corrente média também reduziu em 5,3%, esta redução tem impacto direto no consumo de energia. Logo, pode-se afirmar que após o balanceamento ideal a potência consumida foi reduzida de forma similar.

Verificou-se que para medir a dispersão dos valores de tensão e corrente, a variabilidade apresentou-se como apropriada. No entanto, comparando os comportamentos desta

Tabela 6.2: Comportamento da tensão no barramento DC

<b>Condição de balanceamento da UB</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variabilidade</b>	<b>CLF</b>
Desbalanceada	<b>319,23V</b>	<b>22,92V</b>	<b>0,1436</b>	<b>1,054</b>
Balanceada	<b>311,5V</b>	<b>3,34V</b>	<b>0,0214</b>	<b>1,006</b>
Balanceada com VSD	<b>311,7V</b>	<b>1,67V</b>	<b>0,0107</b>	<b>1,001</b>

Tabela 6.3: Comportamento da corrente na saída do inversor

<b>Condição de balanceamento da UB</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Variabilidade</b>
Desbalanceada	<b>9,28A</b>	<b>0,60A</b>	<b>0,1290</b>
Balanceada	<b>8,91A</b>	<b>0,31A</b>	<b>0,0705</b>
Balanceada com VSD	<b>8,79A</b>	<b>0,17A</b>	<b>0,0390</b>

métrica (variável) e a do desvio padrão, se verifica uma similaridade, que também valida o uso do desvio padrão para este fim.

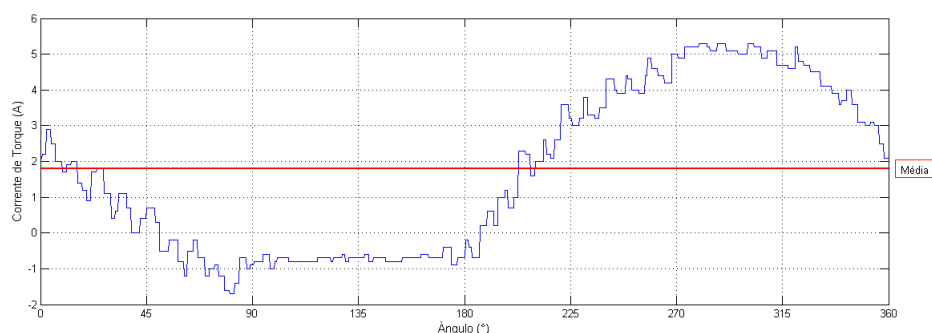


Figura 6.17: Corrente de torque com a UB desbalanceada

Uma importante constatação no estudo de caso, diz respeito a corrente de torque obtida do respectivo parâmetro do inversor. Por meio da figura 6.17 Foi verificado que o valor médio dessa corrente no BM desbalanceado foi de 1,8A e o valor máximo de 5,6A. Sendo a corrente média do sistema balanceado 1,63A e o máximo 4,1A conforme figura 6.18. Diante desta constatação pode-se afirmar que o rendimento do motor ficou maior após o balanceamento do BM.

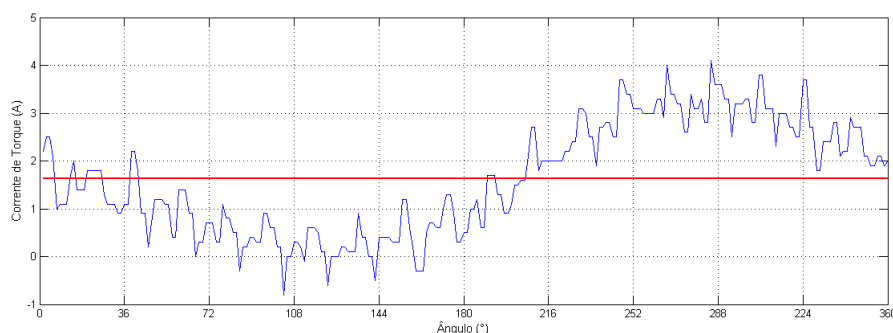


Figura 6.18: Corrente de torque com a UB balanceada

A velocidade média de bombeamento foi de 8,24 cpm. Comparado com o sistema operando apenas com controle de velocidade com  $set - point = 8cpm$  e desbalanceado,

o sistema com balanceamento ideal apresenta um incremento de 3%. Isto pode ser observado analisando a figura 6.19. Outra verificação que pode ser feita é que os limites de velocidade foram respeitados.

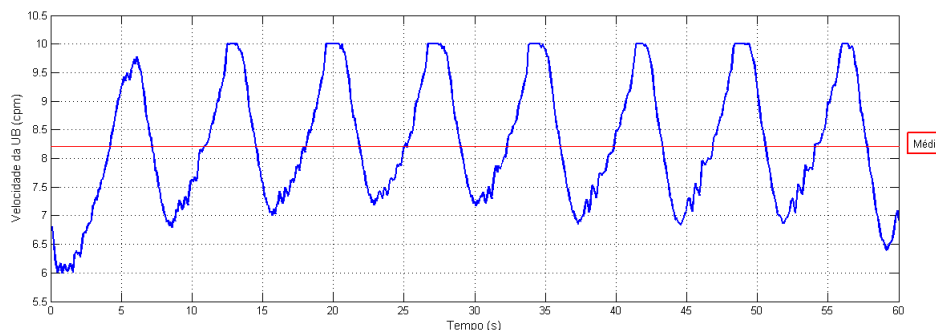


Figura 6.19: Esforço de controle - Variação da velocidade da UB

A figura 6.20 correlaciona a variação da velocidade com o comportamento da tensão no barramento DC do variador de frequência.

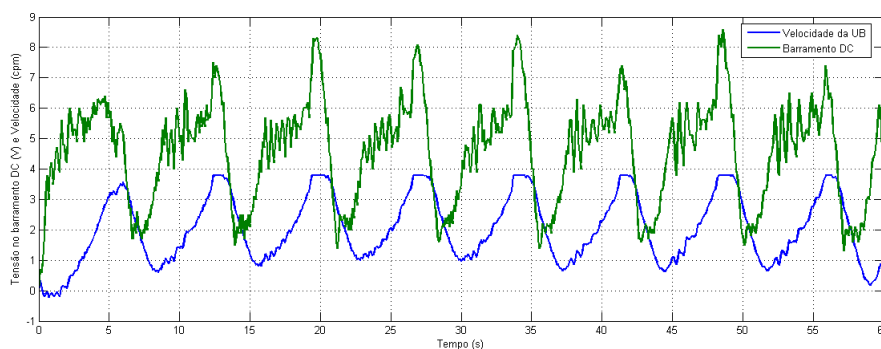


Figura 6.20: Variação da tensão no barramento DC e velocidade da UB

Por fim, e mais importantes, se conseguiu a esperada redução na variação do torque e, por consequência, da potência consumida, a partir do controle da tensão no barramento DC do inversor de frequência e da corrente requisitada pelo motor. Além disso, os esforços mecânicos são reduzidos devido ao torque ser mais estável, com consequências importantes na manutenção e na longevidade do equipamento, reduzindo, os custos diretos e indiretos devido ao desbalanceamento. Principalmente os custos com a manutenção das unidades de bombeio, coluna de hastes e bomba de fundo. Portanto, ao utilizar o controle frequência (velocidade) para minimizar a variação da tensão no barramento DC de um variador de frequência, se tem o objetivado balanceamento otimizado da Unidade de Bombeio e a custos e esforço computacional baixos.

## 7 Conclusão

Graças ao avanço nas tecnologias aplicadas atualmente ao BM, este ainda apresenta oportunidades interessantes para aumento em seu rendimento energético e em sua confiabilidade. Estes dois indicadores foram privilegiados durante o estudo realizado neste trabalho. Viu-se que o rendimento energético do motor que aciona a UB mantém uma relação de proporcionalidade com o CLF. O trabalho de pesquisa feito no sentido de minimizar o valor do CLF possibilitou importantes impactos técnicos e econômicos.

O desenvolvimento do sistema iniciou com a modelagem do problema, onde foi necessário conhecer o comportamento fenomenológico do torque do sistema, com o propósito de compreender como ocorre a sua variação, e como seria possível reduzir a sua variabilidade. Com isto, foi necessário identificar os torques que agem no sistema. Após esta verificação, pode-se constatar que a variabilidade do torque líquido do sistema está associada ao equilíbrio de forças que agem na UB. O modelo obtido nesta fase tem caráter científico importante, pois irá facilitar a compreensão por outros pesquisadores, do comportamento do torque em unidade de bombeio.

Antes da determinação do CLF, a eficácia do método que o utiliza para promover o balanceamento da UB foi comprovada. Isto foi feito por meio de um estudo, onde o método é comparado com outros métodos de contrabalanceamento, e este se mostrou melhor e mais fácil de ser aplicado. Após certificar a eficácia do método para balanceamento utilizando o CLF utilizando um software, que o compara com outros, sua determinação foi priorizada, e se tem um passo-a-passo da determinação do CLF utilizando valores da tensão no barramento DC. Nesta fase pode-se constatar que a variação da tensão no banco de capacitores de um inversor de frequência é uma excelente variável para realização estudos, que visem o contrabalanceamento da unidade de bombeio. Nesta fase, o CLF foi definido utilizando a tensão do barramento DC de um inversor de frequência.

Para que o método fosse aceito sem restrições, foi analisado o comportamento da tensão por meio de transformadas rápidas de Fourier. A maior contribuição deste trabalho vem da comprovação de que, por meio da análise da tensão no barramento utilizando

transformadas rápidas de Fourier, é possível identificar o desbalanceamento do BM e que, quando há desbalanceamento no sistema, o espectro da energia no barramento guarda esta informação que pode ser obtida diretamente e trabalhada para melhorar o desempenho energético e mecânico do sistema.

Após o contrabalanceamento do BM usando o CLF, este ainda apresenta um pequeno desvio que impede que este seja ótimo. Para reduzir os impactos deste desvio, foi apresentada uma estratégia de controle que permitiu reduzir a variabilidade da tensão no barramento DC em um inversor de frequência em mais de 50%. Para que isto se tornasse possível foi implantado um controlador de velocidade, que tem como referência a tensão média de um barramento DC. Após a sintonia desse controlador foi possível verificar a redução da variabilidade da tensão e da corrente. Com esta redução é possível deduzir que o a variação do torque também reduziu. Ao verificar que a variação torque sofreu redução, se tem o equilíbrio entre as forças que atuam no BM.

Finalmente, pode-se afirmar que os objetivos deste trabalho foram alcançados no momento que foi possível conhecer o CLF por meio da tensão medida em um barramento DC. Além disso, foi possível utilizar do valor do CLF para certificar que uma unidade de bombeio estava balanceada. Também se certificou que ao habilitar um controle velocidade sintonizado conforme métrica de projeto, após o balanceamento da UB, este apresentou comportamento bem superior ao esperado.

## 7.1 Características e Vantagens do Sistema Desenvolvido

A redução da vibração dos equipamentos é uma característica introduzida pelo sistema desenvolvido. Isto resulta no aumento do tempo médio entre as falhas destes. Com isto, a confiabilidade da planta também é elevada, sendo esta uma das principais vantagens do sistema desenvolvido.

O sistema se mostra bem adaptado a realidade de poços equipados com BM acionados por inversor de frequência, onde foi comprovada a sua eficácia. No entanto, este poderá ser aplicado para reduzir o desbalanceamento em outras máquinas, beneficiando não apenas a indústria de petróleo. O fato de poder utilizar o sistema em outras indústrias poderá gerar um impacto social importante, pois o uso do sistema que privilegia a redução do consumo de energia sempre gera respostas positivas da sociedade.

Com o uso do sistema, o torque líquido da máquina também é reduzido. Com isto, a variação do escorregamento do motor é menor, o que resulta num maior fator de potência.

Logo, a potência ativa do motor é maior, e se tem melhor aproveitamento da energia elétrica fornecida ao motor, elevando o rendimento elétrico do sistema. Além dos benefícios econômicos, o sistema tem forte compromisso com meio ambiente.

Outro fator importante diz respeito à potência consumida, que é reduzida para sistema com CLF menor, pois as perdas por efeito Joule são minimizadas. A redução da intensidade do primeiro harmônico do espectro de energia do barramento DC dos inversores gera impactos na qualidade da energia da planta. Com isto, se têm melhor aproveitamento da energia fornecida pela concessionária.

Os investimentos necessários para implantar o sistema é outra vantagem importante. Pois, os custos são considerados baixos, sempre que as máquinas em questão têm seus motores acionados por inversores de frequência. A determinação do grau de desbalanceamento, tendo como variável de interesse a tensão do barramento DC de um inversor de frequência e utilizando processamento digital de sinais, remete o trabalho a outro grau de importância. Pois, apenas medindo esta variável no tempo, transportando-a para o domínio da frequência, analisando e reduzindo a intensidade do seu sinal é possível balancear um equipamento.

## 7.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

O desenvolvimento de um produto (software) para obtenção do CLF, por meio da tensão do barramento DC no próprio inversor de frequência é um trabalho que iria contribuir para a introdução do conceito no setor produtivo, aproveitando-se os recursos de hardware já utilizados pela indústria.

O desenvolvimento de um produto (software) que priorize uma metodologia que permita minimizar o valor do CLF, durante o balanceamento da unidade de bombeio também seria um trabalho relevante para continuação deste trabalho.

Uma ferramenta para diagnóstico, baseada em processamento de sinais, visando identificar harmônicos e definir suas intensidades contribuirá na identificação de condições de vibração em máquinas equipadas com inversores de frequência. Isto poderá facilitar a vida da manutenção em ambientes fabris.

Por fim, outro importante trabalho a ser desenvolvido a partir deste, é embarcar um controlador em inversores com o propósito de promover o balanceamento ideal do BM. Neste caso, pode-se optar por estratégias formais, de projeto de controlador, tais quais

privilegiem a adaptabilidade a não linearidade da planta, como exemplo pode-se utilizar técnicas de controle adaptativo.



## Referências

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for pumping Units API Spec. 11E. 15th ed. American Petroleum Institute, 1988.**

UNITED STATES PATENT. Thomas L. Beck, Ronald G. Peterson, Mark E. Garlow e Theresa Smigura. **Rod pump control system including Parameter Estimator.** 30 Jan 2007. US 7168924 B2.

BIRD, J. P.; BEASLEY, W. L. Predicting prime mover requirements, power costs, and electrical demand for beam pumping units. In: ANNUAL TECHNICAL MEETING - PETROLEUM SOCIETY OF CANADA. **25th annual meeting.** Calgary , AB Canadá, 1974. p. 18.

DURHAM, M. O.; LOCKHERD, C. R. Effect of cyclic loading on motor efficiency. In: PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY COMMITTEE TECHNICAL CONFERENCE. **Petroleum and Chemical Industry Committee of the IEEE.** Calgary, AB Canadá, 1998. v. 24, n. 6, p. 7.

FILHO, M. de A. B. **Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1993.

FUYU, W.; GUOMING, C. The virtual experiment system of sucker-rod pumping development and its application. In: 2ND - INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, CONTROL AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 2010, Wuhan, China. **CCIE2010.** Wuhan: IEEE, 2010. p. 178–181.

UNITED STATES PATENT. Sam G Gibbs. **Method Of Determinig Sucker Rod Pump Perfomance.** Oct, 21 1967. US 3.343.409.

GIBBS, S. G. Computing gearbox torque and motor loading for beam pumping units with consideration of inertia effects. v. 27, n. 9, p. 1153–1159, Out 7-10 1974.

GIPSON, F. W.; H.W., S. The beam pumping desing chain. In: 31ST ANNUAL SOUTHWESTERN PETROLEUM SHORT COURSE. **Lubbock Texas.** [S.I.], 1984.

HOWELL, J. K.; HOGWOOD, E. E. **Electrified Oil Production.** Chapter 7. [S.I.]: Petroleum Publishing Co, 1962.

KEMLER, E. N. Counterbalancing of oil-well pumping machines. In: DRILLING AND PRODUCTION PRACTICE, 1943. [S.I.]: American Petroleum Institute.

K.ROSE, B. **Modern Power Electronics And Ac Drives.** 1. ed. Tennessee: Prentice, 2001. ISBN 0-13-016743-6.

- LIU, X. et al. An approach to the computation of motor loading for a pumping unit. In: 2ND - INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL MECHATRONICS AND AUTOMATION, 2010, Wuhan, China. **ICIMA2010**. Wuhan: IEEE, 2010. p. 118–121.
- MCCOY, J. et al. Motor power/current measurement for improving rod pump efficiencies. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Production Operations Symposium**. Oklahoma, 1997. p. 814–826.
- NSK DO BRASIL. **Vibrações Mecânicas Aplicadas à Manutenção**. Brasil, 2004. 21 p.
- ORDOÑEZ, B. **Proposta de Controle de Operação de Poços Com Bombeio Mecânico Através da Pressão de Fundo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- PACHECO, J. R. da S. **Reconhecimento de padrões de vibração em máquinas rotativas utilizando rede neural artificial**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2007.
- PARTYKA, S. **DC Link Voltage Control**. [S.l.], 2008.
- UNITED STATES PATENT. Ronald G. Peterson. **Power Variation Control System For Cyclic Loads**. 22 Jan 2008. US 7321211 B2.
- QUINTAES, F. de O. et al. Unidade de bombeio mecânico inteligente. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS - IBP, IBP207810., 2010, Rio de Janeiro, Brasil. **Rio Oil and Gas Expo and Conference 2010**. Rio de Janeiro: IBP, 2010. p. 10.
- SÁ, M. **Curso de vibrações**. Brasil, 2000.
- SNYDER, W. E.; BOSSERT, A. J. Analogic computer simulation of sucker rod pumping systems. In: JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY. **SPE Production Operations Symposium**. Dallas - Texas, 1963.
- TAKÁCS, G. **Sucker-Rod Pumping Manual**. 3. ed. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 2003.
- THOMAS, J. E. et al. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. ISBN 85-7193-046-5.
- TILIMPES, S. Metodã de calcul pentru optimizarea echilibrãrli unitãtilor de pompare cu balansier. In: MINE PETROL SI GAZE, NR.6. [S.l.]: Institutul de Petrol si gaze ploiesti, 1987. p. 274–279.
- TORRES, L. H. S. et al. Contribuições na validação experimental do modelo de um sistema de bombeio mecânico. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS, IBP3138-10., 2010, Rio de Janeiro, Brasil. **Rio Oil and Gas Expo and Conference 2010**. Rio de Janeiro: IBP, 2010. p. 7.
- TRIGGIA, A. A. **Modelo do Contrabalancamento da UB**. Brasil, 2010.
- WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Brasil, 2009.

## APÊNDICE A – Programa: Balanceamento da UB - Modelo de Craft

Este programa foi desenvolvido em ambiente MatLab, sendo utilizado para alimentar as variáveis do programa torques líquidos, descrito na próxima seção.

% valores dos parâmetros da unidade de bombeio

x=[0:pi/12:2\*pi]; % ângulo de giro do contrapeso, dividido em intervalos de pi/6 radianos (30 graus) c=1.37; % 54.02 in -> 1.37m

i=1.37; % 54.02 in -> 1.37m

k=1.99; %  $k = \sqrt{i^2 + (h - g)^2}$  % 78.58 in -> 1.99m

p=1.44; % 56.61 in -> 1.44m

r=0.69; % 27.40 in -> 0.69m

% H=2.09 metros - 232 pol

a=1.47; % 57.99 in -> 1.47m

% g=0.61 metros - 96 pol

% Valores cinemáticos da unidade

massa=70.248; % 154.86848 lbm -> 70.248kg massa total do conjunto de hastes

coef =  $0.649 * 10^{-6}$ ; % coeficiente elástico do conjunto de hastes

b=0.1; % Fator de amortecimento

amp=0.71; % 28 in -> 0.71m

cpm=6;

fastes=[2310.72,3096.33,3521.76,3463.18,4358.41,4416.99,3653.71,3052.25,2206.90, 2309.85,2441.1707.81,2600.14,2785.16,2362.63,2074.95,2312.75];

fpp=[0:24;2310.72,3096.33,3521.76,3463.18,4358.41,4416.99,3653.71,3052.25, 2206.90,2309.85,2441.1707.81,2600.14,2785.16,2362.63,2074.95,2312.75];

fp=fpp'; % transposta

% Cálculo dos ângulos envolvidos

```

o=asin(i/k);
betar=acos(((c*c)+(p*p)-(k*k)-(r*r)+2*k*r*cos(x-o))/(2*c*p)); % ângulo entre  $f_p$  e c, em radia-
anos
betan=180*betar/pi; % transformação para graus
h=sqrt((r*r)+(k*k)-2*r*k*cos(x-o));% variável intermediária
fr=asin(p.*sin(betar)./h)-asin(r.*sin(x-o)./h); % ângulo entre K e C, em radianos
fn=180*fr/pi; % transformação para graus
alfar=betar+fr-(x-o);% ângulo entre R e  $F_p$ 
alfan=180*alfar/pi;% transformação para graus
alfa=[0:24;alfar];% adição do tempo para o simulink
alfa=alfa';% transposta
beta=[0:24;betar];% adição do tempo para o simulink
beta=beta';% transposta
xs= [0:24;x];% adição do tempo para o simulink
xs=xs';% transposta
w=pi*cpm/30;% Velocidade angular em relação a ciclos por minutos
s=amp/2*(1-cos(x));
ss=[0:24;s];
ss=ss';

```

% Cálculo do cbe

```

cbem=0;
cbemin=1000000;
for i =1:24
if (cbem<fastes(i)) cbem=fastes(i); end if (cbemin>fastes(i)) cbemin=fastes(i); end end
cbe=(cbem+cbemin)/2;
su=14.93;

```

% Cada ponto da medida do contrabalanceio vale 79mm = 3.11024 pol.

## A.1 Programa: Cálculo dos Torques

O diagrama em bloco representa os cálculos propostos no capítulo 3 deste trabalho e foi desenvolvido em ambiente Simulink. Os parâmetros que alimenta as entradas dos blocos, se encontram descritos na seção anterior, eles podem ser configurados em arquivo .m do MatLab.

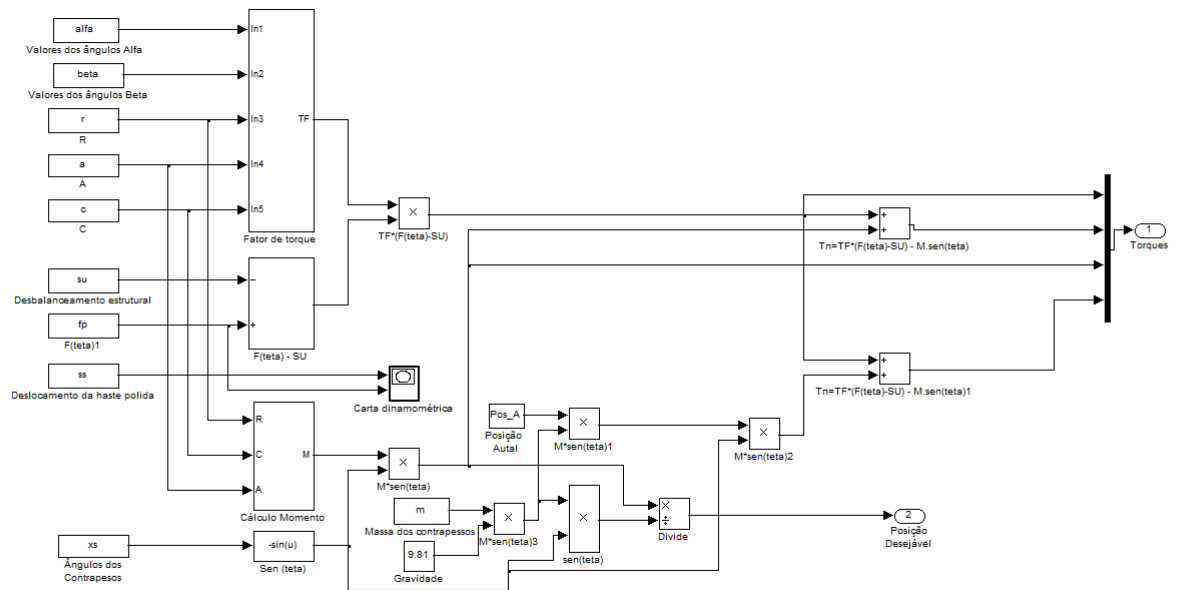


Figura A.1: Programa - Torques Líquidos

## APÊNDICE B – Motor de Indução

Todas as informações contidas nesta seção foram extraídas de (K.ROSE, 2001). Este material pode ser utilizado para revisar e compreender o comportamento do torque em motores de indução.

Os motores de indução são amplamente utilizados na indústria, em particular, o tipo gaiola. Estes equipamentos são baratos, robustos e confiáveis. Além disso, estão disponíveis em ampla faixa de potência. Sendo, geralmente, os motores de pequeno porte monofásico e os maiores trifásicos. Estes últimos podem chegar a fornecer muitos MW de potência. Além disso, podem operar com velocidades variáveis.

A figura B.1 mostra um motor idealizado, onde se tem um motor de indução trifásico, tipo gaiola, com dois polos representados no estator por as, bs e cs e seus conjugados, o rotor está representado pelo bobinado central com ar, br, cr e conjugados. O rotor tem uma estrutura formada por anéis curto circuitados, denominada gaiola de esquilos. Basicamente, esta máquina pode ser analisada como um transformador trifásico, com o secundário rotativo e curto circuitado. Ambos, rotor e estator são construídos utilizando chapas de ferromagnético. Sendo a distância entre eles bem uniforme e denominada entreferro.

### B.1 Campo Magnético Girante

O princípio fundamental de um motor de indução é criar um campo girante senoidal distribuído na região entre ferro. Portanto, analisando as correntes derivadas das tensões senoidais aplicadas no estator se tem:

$$i_a = I_m \cos \omega_e t \quad (\text{B.1})$$



A figura B.2 representa uma onda de força em função do tempo produzido no estator de um motor. Quando  $t=0$ , se tem:  $i_a = I_m$ ,  $i_b = -\frac{I_m}{2}$  e  $i_c = \frac{I_m}{2}$ .

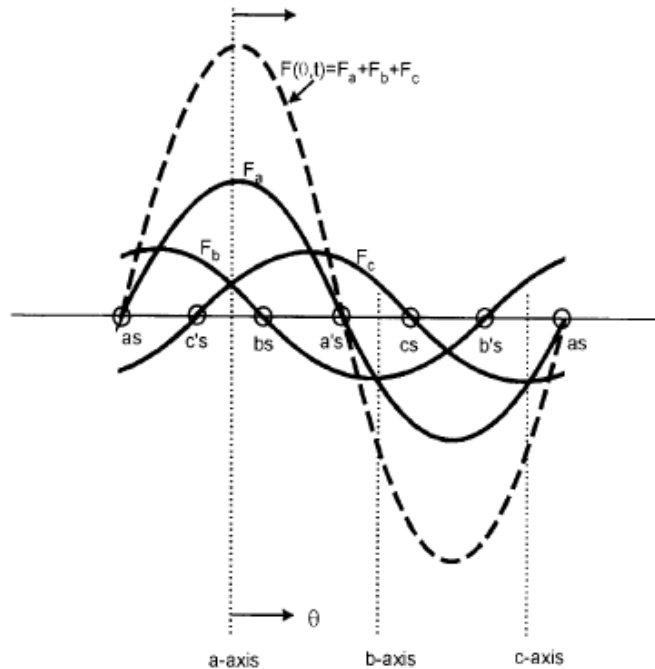


Figura B.2: [Distribuição de forças em um motor idealizado (K.ROSE, 2001, p.32)]

Substituindo as equações B.1 a B.2 na B.7, tem-se:

$$F(\theta, t) = NI_m \left[ \cos \omega_e t \cos(\theta) + \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{B.8})$$

Simplificando a equação B.8 a força resultante é obtida:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m (\cos \omega_e t - \theta) \quad (\text{B.9})$$

A equação B.9 indica que a onda de força senoidal distribuída na região de entreferro é máxima  $3/2 NI_m$ , quando a velocidade é síncrona. Em uma máquina de dois polos,  $F(\theta, t)$  o rotor faz uma revolução a cada ciclo de variação de corrente. Por estes meios pode-se afirmar que em uma máquina que tem P-polos a velocidade é dada por:

$$N_e = \frac{120 f_e}{P} \quad (\text{B.10})$$

onde,  $N_e$  representa a velocidade síncrona dada em (rpm), e  $f_e = \frac{\omega_e}{2\pi}$  em (Hz) repre-



senta a frequência de acionamento do estator.

## B.2 Produção do Torque

Se o rotor inicialmente se encontra em estado estacionário, então, seus condutores irão ser submetidos à varredura do campo magnético produzido no entreferro, induzindo corrente no rotor curto circuitado na mesma frequência. A interação do fluxo no entreferro e o rotor produz força eletromotriz, e conseqüentemente, torque. A figura B.3 a, b e c representa um exemplo de interação.

Em velocidade síncrona entre rotor e estator, não há indução de corrente, conseqüentemente, o torque não é produzido. Em outra velocidade  $Nr$  tem-se um diferencial de velocidade, isto dá origem ao escorregamento do motor (do termo inglês, *Slip*) dado por:

$$S = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_{sf}}{\omega_e} \quad (\text{B.11})$$

$$\omega_m = 2P\omega_r \quad (\text{B.12})$$

Evidentemente, a tensão é induzida no rotor com a frequência de escorregamento, tal que, produza uma corrente no rotor com esta mesma frequência. A figura B.3a corresponde a onda de intensidade do fluxo senoidal no entreferro se movendo a uma velocidade,  $\omega_e$ , induzindo tensão no rotor, como mostra as linha verticais. O fator de potência, ângulo  $(\theta)_r$ , representa o atraso entre a corrente e a tensão, ilustrado na figura B.3b. O percurso da força eletromotriz produzida pelo rotor pode ser construído a partir da forma de onda da corrente, tal qual pode ser aproximada da linha tracejada, figura B.3c.

$$T_e = \pi \left( \frac{P}{2} \right) l r B_p F_p \sin \delta \quad (\text{B.13})$$

Onde  $P$  = número de polos,  $l$  = comprimento do eixo da máquina,  $r$  = raio da máquina,  $B_p$  = valor máximo da densidade do fluxo no entreferro,  $F_p$  = valor máximo da força eletromotriz, e ângulo  $\delta = \frac{\pi}{2} + \theta_r$  é definido como ângulo de torque.

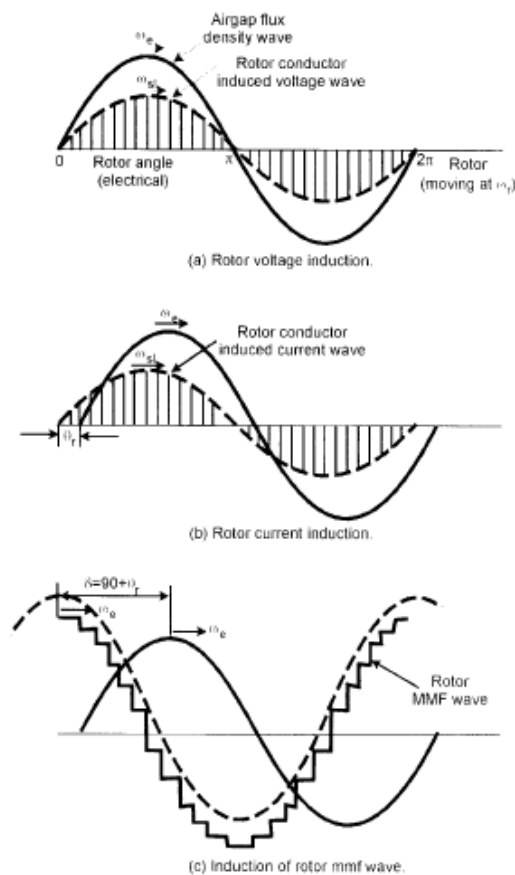


Figura B.3: Torque produzido pela interação de forças no entreferro e no rotor (K.ROSE, 2001, p.34)

## B.3 Torque em Motores de Indução

O torque em um motor de indução tem relação direta com escorregamento, podendo, este sofrer variações em função da falta de sincronismo entre a frequência do rotor e a frequência de acionamento do estator. Um modelo de como ocorre à produção do torque em motores trifásicos é apresentado a seguir. A relação entre velocidade e torque será analisada com o propósito de identificar o comportamento dessas máquinas operando como motor ou gerador. Para isto se faz necessário analisar o motor por meio de um modelo simplificado.

### B.3.1 Circuito Equivalente de um Motor

A figura B.4 mostra um circuito simplificado de uma fase de um motor trifásico.

A corrente no rotor  $I_r$  é dada por:

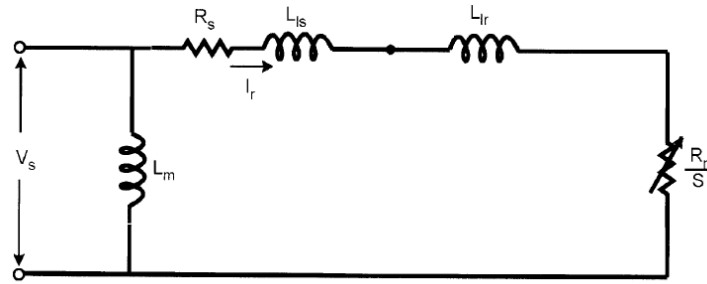


Figura B.4: Circuito equivalente de uma fase de motor trifásico (K.ROSE, 2001, p.36)

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + \omega_e^2(L_{is} + L_{ir})^2}} \quad (\text{B.14})$$

Portanto, o torque fornecido pelo motor pode ser dado por:

$$T_e = 3\left(\frac{P}{2}\right) \frac{R_r}{S\omega_e} \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + \omega_e^2(L_{is} + L_{ir})^2}} \quad (\text{B.15})$$

### B.3.2 Curva de Velocidade *versus* Torque

A máquina mais utilizada para acionar as unidades de bombeio é o motor de indução trifásico, por isto, a curva de torque desse tipo de máquina será analisada. O objetivo é analisar a curva de torque-velocidade e mostrar como o escorregamento influencia na elevação e redução da tensão da fonte que alimenta o seu estator.

O torque  $T_e$  pode ser calculado como função do escorregamento  $S$  equação B.15. A figura B.5 mostra a curva torque-velocidade, onde, na região  $\frac{\omega_r}{\omega_e} = 1 - S$ , o comportamento de  $S$  é analisado para valores  $0 < S < 1$ . A zonas podem ser definidas como, partindo  $1.0 < S < 2.0$  , auto movimento ( $0 < S < 1$ ) (motor) e regenerando ( $S < 0$ )(gerador). Na região normal de operação  $T_e = 0$  em  $S = 0$ . O torque  $T_{es}$  durante a partida do motor pode ser obtido quando  $s = 1$ , portanto substituindo  $S$  na equação B.15.

$$T_e = 3\left(\frac{P}{2}\right) \frac{R_r}{\omega_e} \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + \omega_e^2(L_{is} + L_{ir})^2}} \quad (\text{B.16})$$

Na região de acoplamento, partida, do motor, onde  $S > 1$  a rotação do rotor é oposta a rotação do campo girante do estator.

Na região de regeneração a máquina funciona como gerador. O motor se move numa

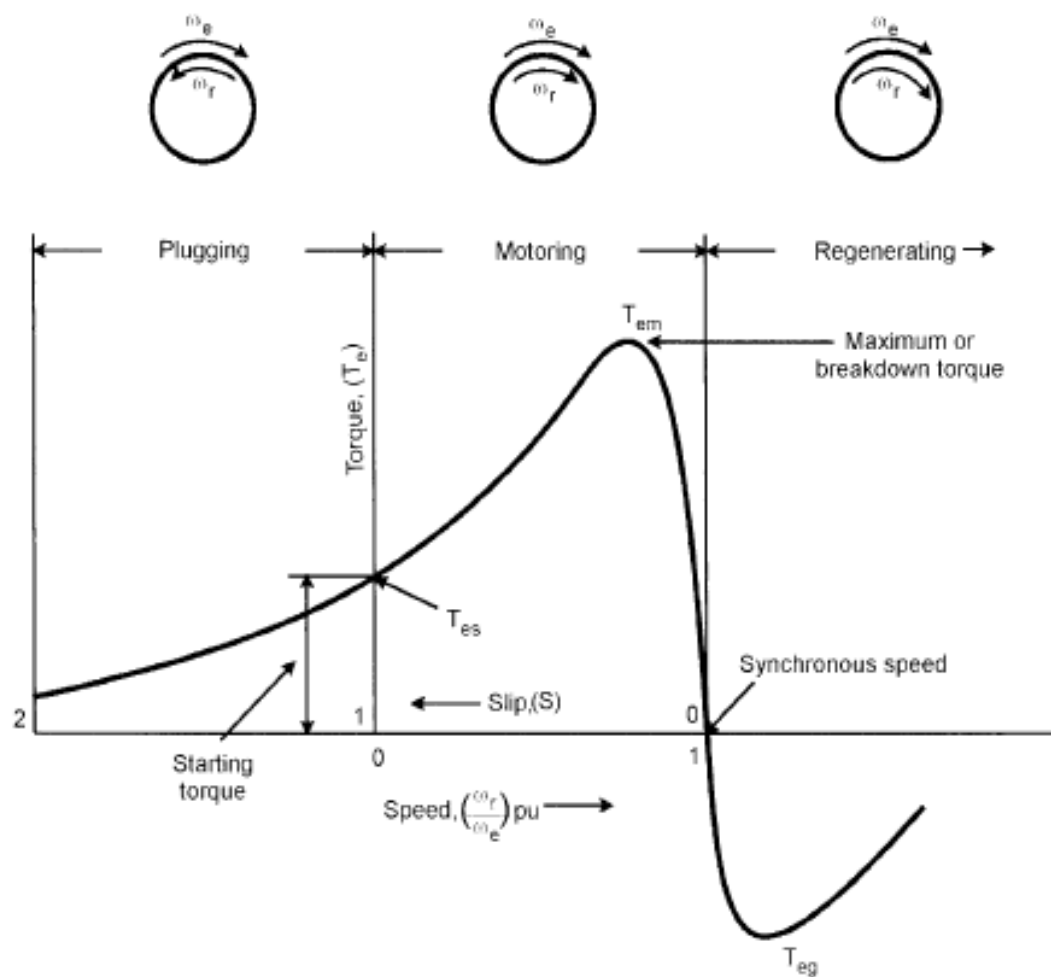


Figura B.5: Curva de torque de um motor de indução(K.ROSE, 2001, p.40)

velocidade assíncrona na mesma direção do fluxo magnético do entreferro, de modo que o escorregamento fique negativo, criando negativo ou regenerativo torque. O escorregamento negativo, corresponde a uma resultante negativa entre  $\frac{R_r}{S}$  na figura B.4. A resistência  $\frac{R_r}{S}$  é positiva na região automático (motor), mas a resistência negativa  $\frac{R_r}{S}$  gera energia, devolvendo-a para a fonte.

Diferenciando a equação B.15 em relação a  $S$  e igualando a zero, tem-se:

$$s_m = \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_e^2(L_{is} + L_{ir})^2}} \quad (\text{B.17})$$

Onde,  $s_m$  corresponde ao escorregamento, quando o torque é máximo  $T_{em}$ . Substituindo  $s_m$  na equação B.15 é possível obter o torque máximo da máquina operando na região motor.

$$T_{em} = \frac{3 P}{4 \omega_e} \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s^2 + \omega_e^2 (L_{is} + L_{ir})^2) + R_s}} \quad (\text{B.18})$$

Quando a máquina estiver operando na região de regeneração, como gerador o torque é dado por:

$$T_{eg} = -\frac{3 P}{4 \omega_e} \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s^2 + \omega_e^2 (L_{is} + L_{ir})^2) - R_s}} \quad (\text{B.19})$$

Por meio da equação B.19 se tem apresentado o comportamento do torque quando o motor opera com velocidade assíncrona, como gerador.

## APÊNDICE C – Classificação de Motor de Indução - NEMA

A classificação dos motores de indução tipo gaiola é definida pela *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)* para diferentes categorias de máquinas de indução, visando atender as demandas das diferentes aplicações industriais. Sendo estes classificados de acordo com a curva de torque vs velocidade. O mais importante parâmetro representado por esta curva está relacionado à resistência rotórica. Classe A é caracterizada pelo torque baixo na partida, alta corrente de partida e escorregamento baixo durante a operação. A classe A tem baixa resistência rotórica, e conseqüentemente, a eficiência é alta em baixo escorregamento. A classe B é comumente utilizada para acionar máquinas indústrias com velocidade constante. O torque e a corrente de partida e torque máximo são pouco menores em motores classe B, quando comparados classe A, mas as máquinas classe B tem escorregamento um pouco maior que as classes A. Ambos os motores classe C e D são caracterizadas por oferecer alto torque e baixa corrente na partida, devido à alta resistência rotórica. Também existem os motores de alta eficiência classe E.

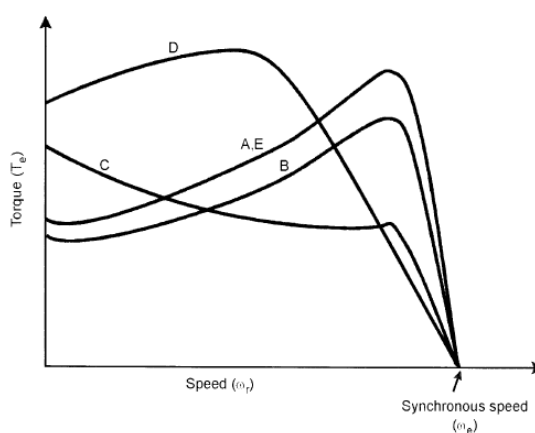


Figura C.1: NEMA - Classificação de motor de indução (K.ROSE, 2001, p.42)

## APÊNDICE D – Programa - Torques

Por meio deste programa é possível se fazer um paralelo entre os principais métodos utilizados para balancear um sistema de bombeio mecânico.

```

Public ang(80), f(80), xtf(80), tfmax, clfmin, ubipt, spm
Public filename1 As String, x(500), y(500), np, area
Public tm(80), tm2(80), tmax(50), tmin(50)
Public tmc(80), tmc2(80), tme(80), tme2(80), tx(80), tx2(80)
Declare Sub Kindll Lib "Kindll.dll"(ByRef ent As Single, ByRef pr As Single, ByRef tf As Single)

Function YNTER(Xd(), Yd(), N, A)
    K1 = 0
    If A <= Xd(1) Then K1 = 2
    If A >= Xd(N) Then K1 = N
    If K1 > 0 Then GoTo 10

    For i = 2 To N
        If A < Xd(i) Then
            K1 = i
            GoTo 10
        End If
    Next i

    YNTER = Yd(K1 - 1) + (Yd(K1) - Yd(K1 - 1)) / (Xd(K1) - Xd(K1 - 1)) * (A - Xd(K1 - 1))
End Function

```

```
Sub ForceAPI( )  
Dim ent(1 To 13) As Single, pr As Single, tf As Single  
Dim ypr(80), yprd(80), fdd(80)  
Dim xu(500), xud(500), ydd(500), fd(500)
```

'Calcula-se a cinemática da *UB* por harmônicos

```
ent(1) = 2  
ent(2) = 1  
ent(3) = 1
```

```
pi = 3.141592654  
spu = -10000
```

```
For i = 1 To np  
If x(i) > spu Then  
spu = x(i)  
imax = i  
End If  
Next i
```

```
ent(4) = spu
```

```
yprmax = -100000  
tfmax = -100000
```

```
For i = 1 To 72  
temp = (i - 1) * 5  
ent(5) = temp * pi / 180  
ang(i) = ent(5)  
Call Kindll(ent(1), pr, tf)  
ypr(i) = pr  
xtf(i) = tf  
If ypr(i) > yprmax Then  
yprmax = ypr(i)  
imaxk = i
```



```
End If
If xtf(i) > tfmax Then
tfmax = xtf(i)
End If
Next i
ypr(73) = ypr(1)
xtf(73) = xtf(1)
ang(73) = 2 * pi
```

'Calculam-se as forças e  $TF$  para cada ângulo da manivela do curso ascendente

```
For i = 1 To imax
xu(i) = x(i) / spu
Next i
```

'Agora se tem o vetor carga (y) x curso unitário (xu)

```
For i = 1 To imaxk
f(i) = YNTER(xu, y, imax, ypr(i))
Next i
```

'A força para cada 5 graus da manivela o fator de torque já foi calculado.

'Calcula-se as forças e  $tf$  para cada ângulo da manivela do curso descendente

npd = np - (imax + 1) + 1 'Número de pontos do curso descendente da carta

```
For i = 1 To npd 'Com o curso unitário
xud(i) = x(np - i + 1) / spu
ydd(i) = y(np - i + 1)
Next i
```

```
For i = 1 To npd
fd(i) = YNTER(xud, ydd, npd, xud(i))'Vetor de f com x adimensional da carta
Next i
```

'Inverter o vetor ypr. O número de pontos ascendente é imaxk.

'O número de pontos descendente é 73-(imaxk+1)+1

npdr = 73 - (imaxk + 1) + 1

For i = 1 To npdr

yprd(i) = ypr(73 - i + 1)

Next i

'Calcula-se a força para o curso descendente.

For i = 1 To npdr

fdd(i) = YNTER(xud, ydd, npd, yprd(i))

Next i

For i = 1 To npdr

f(imaxk + i) = fdd(i)

Next i

End Sub

Sub choice(peakt, mens)

Dim ubt(13)

ubt(1) = 25: ubt(2) = 40: ubt(3) = 57: ubt(4) = 80

ubt(5) = 114: ubt(6) = 160: ubt(7) = 228: ubt(8) = 320

ubt(9) = 456: ubt(10) = 640: ubt(11) = 912: ubt(12) = 1280: ubt(13) = 1824

If peakt > 1824 Then

mens = "No unit"

Exit Sub

End If

For i = 1 To 13

```
If ubt(i) > peakt Then GoTo 10  
Next i
```

```
10: mens = Str(ubt(i))  
ubipt = ubt(i)
```

```
End Sub
```

```
Sub motor(clf, hp)
```

```
prhp = area * spm / 396000
```

```
xgraf = 4960 * prhp / (ubipt * 1000)
```

```
A1 = 58.984819
```

```
b1 = 1.3883025
```

```
c1 = 0.070764494
```

```
eff = A1 * (b1 - Exp(-c1 * xgraf))
```

```
efmec = eff / 100
```

```
hp = prhp * clf / efmec
```

```
End Sub
```

```
Sub clfactor(tx(), tx2(), clfcalc)
```

```
H = 5 / 180 * 3.141592
```

```
Sum = tx2(1) + tx2(73)
```

```
For i = 2 To 72
```

```
Sum = Sum + 2 * tx2(i)
```

```
Next i
```

```
A1 = Sum * H / 2
```

```
Sum = tx(1) + tx(73)
```

```
For i = 2 To 72
```

```
Sum = Sum + 2 * tx(i)
```

```
Next i
```

```
a2 = Sum * H / 2
```

```
XNUM = Sqr(A1 / ang(73))
```

```
DEN = a2 / ang(73)
```

```
clfcalc = XNUM / DEN
```

```
End Sub
```

## APÊNDICE E – Programa: Análise Espectral da Tensão no Barramento DC

Para obter o espectro de densidade de potência, os dados de tensão no barramento DC e tempo foram submetidos ao procedimento a seguir.

Primeiramente, com o BM desbalanceado, foi amostrado um sinal com um período de amostragem de 4 milissegundos e 8000 amostras, gerando, o vetor tensão do barramento DC (Y) e tempo (t). Este dados foram processados utilizando o software MatLab.

Para obter o espectro de energia no domínio da frequência é preciso operacionalizar este programa.

### Programa:

Gera um gráfico contendo todas as amostras.

```
plot (t,y)
```

Gera um gráfico com um número de amostra delimitado.

```
plot(t(1:8000),y(1:8000),'b.-');
```

Para extrair características do sinal, aplica-se uma Transformada Rápida de Fourier no vetor da tensão do barramento DC.

```
Y = fft(y);
```

```
Y(1)=[];
```

Gera um gráfico com Coeficientes de Fourier no plano complexo.

```
plot(Y,'ro')
title(' Coeficientes de Fourier no Plano complexo');
xlabel('Eixo Real');
ylabel('Eixo Imaginário');
n=length(Y);
```

Nas próximas linhas do programa, o espectro de densidade de potencia do sinal é obtido, ou seja, o quadrado da magnitude dos coeficientes. O espectro é apresentado em um gráfico de densidade de potência versus frequência.

```
power = abs(Y(1:floor(n/500))).2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/500)/(n/500)*nyquist;
plot(freq, power)
xlabel('Ciclos/Segundo')
title('Periodograma')
```

A escala em ciclos por segundo é um pouco inconveniente. Optou-se por plotar segundo / ciclo e estimar o comprimento de um ciclo.

```
period=1./freq;
plot(Período,Potência);
axis([0 16 0 1.5e+10]);
ylabel('Potência');
xlabel('Período (Segundo/Ciclo)');
```

Finalmente, pode-se notar que a frequência de maior potencia é justamente a frequência de operação da maquina. O ponto vermelho localiza este ponto.

```
hold on;
index=find(power==max(power));
mainPeriodStr=num2str(period(index));
plot(period(index),power(index),'r','MarkerSize',25);
text(period(index)+2,power(index),['Período = ',mainPeriodStr]);
```

hold off;

Para facilitar a compreensão o programa foi executado por partes, com os respectivos gráficos gerados e apresentados no capítulo 6.

## APÊNDICE F – Programa do CLP

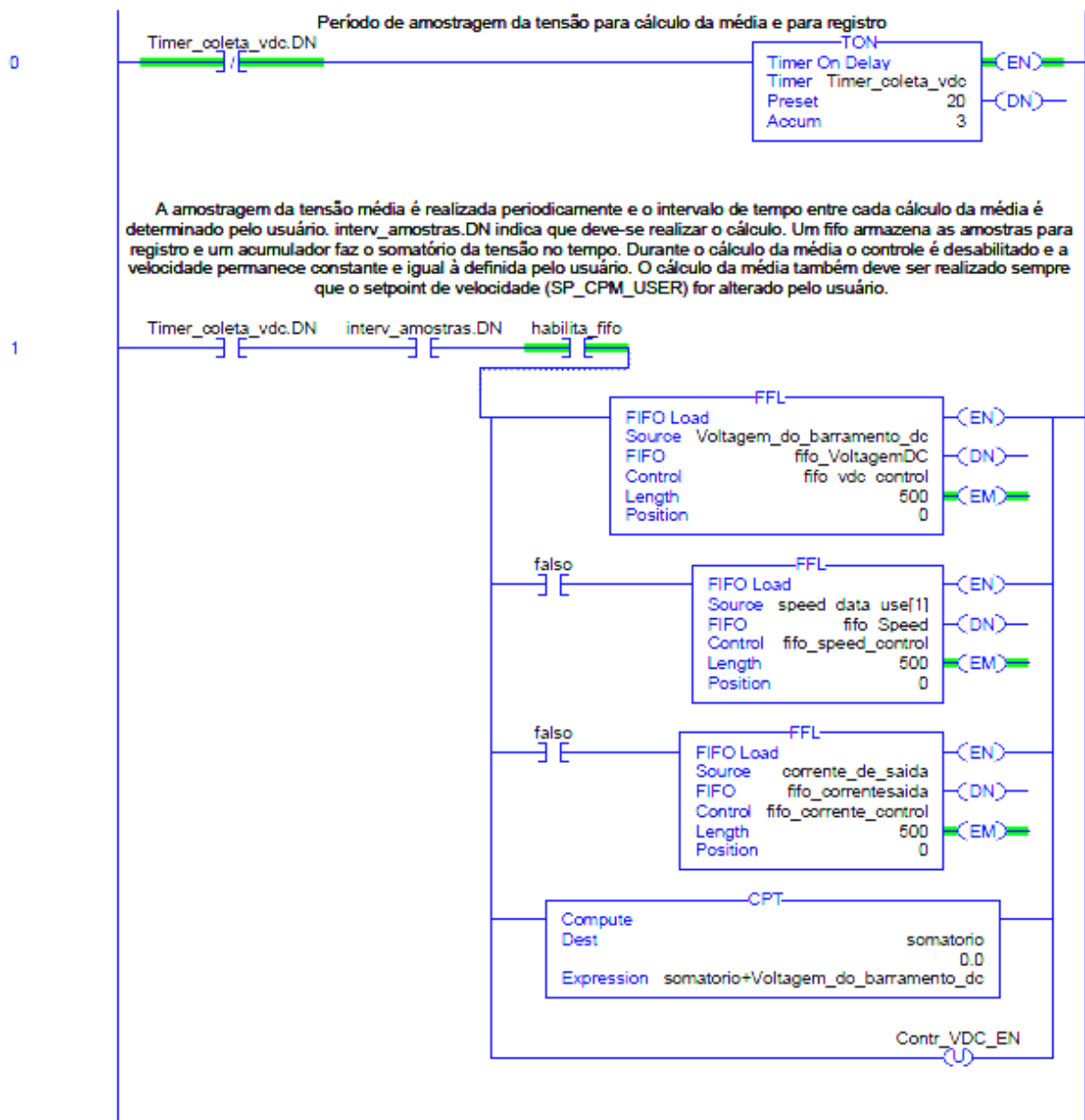


Figura F.1: Programa do CLP - Página 1 de 5





Figura F.2: Programa do CLP - Página 2 de 5

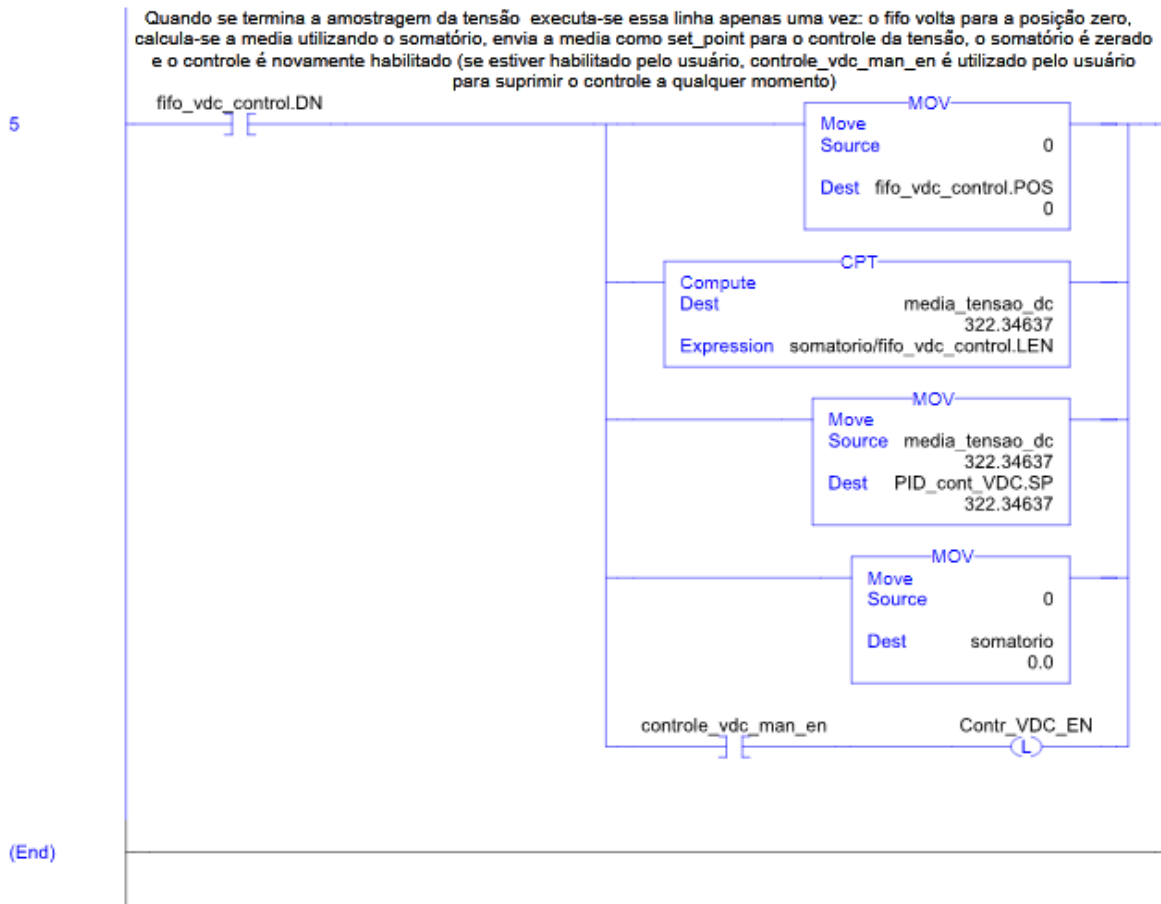


Figura F.3: Programa do CLP - Página 3 de 5

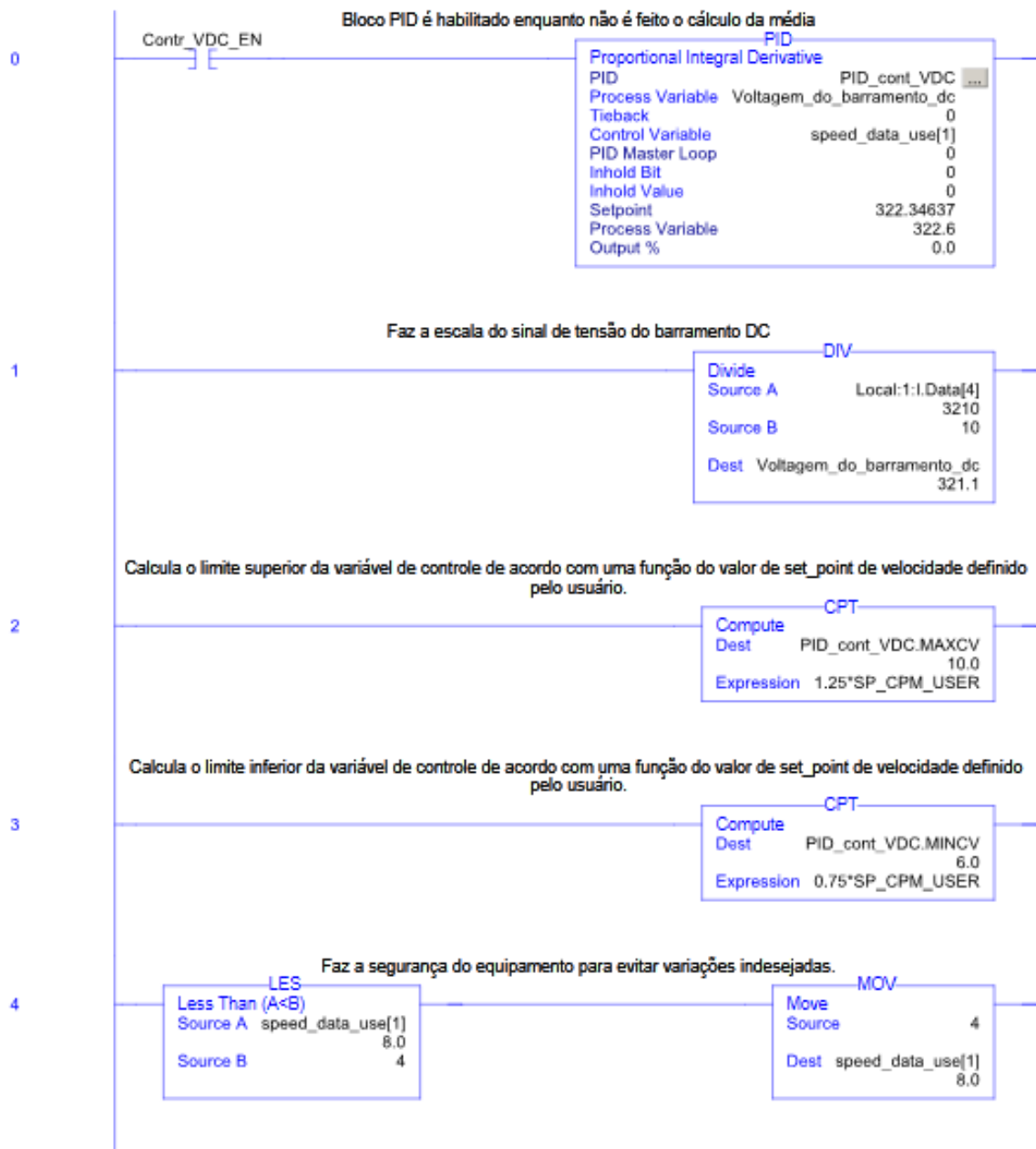


Figura F.4: Programa do CLP - Página 4 de 5

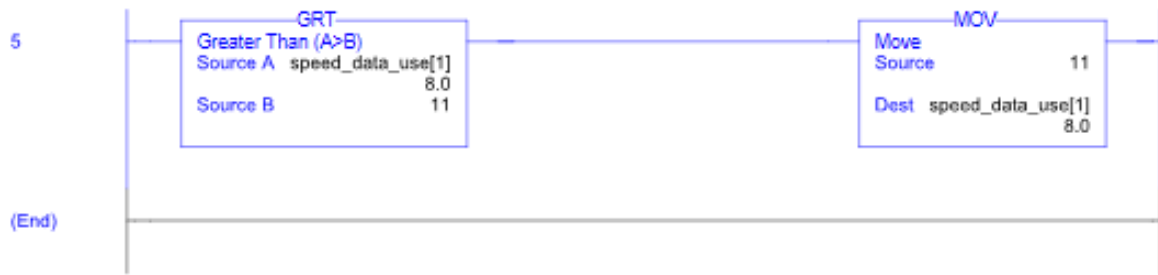


Figura F.5: Programa do CLP - Página 5 de 5