



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

**GALDIR DAMASCENO REGES JUNIOR**

**NOVA ABORDAGEM PARA AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO DE  
SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE SEGMENTOS DAS CARTAS DINAMOMÉTRICAS**

SALVADOR

2014



**GALDIR DAMASCENO REGES JUNIOR**

**NOVA ABORDAGEM PARA AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO DE  
SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE SEGMENTOS DAS CARTAS DINAMOMÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia para  
obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Leizer Schnitman

SALVADOR

2014

---

R333 Reges Junior, Galdir Damasceno

Nova abordagem para auxílio ao diagnóstico de sistemas de bombeio mecânico de petróleo através da análise de segmentos das cartas dinamométricas / Galdir Damasceno Reges Junior. – Salvador, 2014.

116 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Leizer Schnitman.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Bombeamento mecânico - diagnóstico. 2. Cartas dinamométricas. 3. Lógica difusa. I. Schnitman, Leizer. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 665.5

---



GALDIR DAMASCENO REGES JUNIOR

**NOVA ABORDAGEM PARA AUXÍLIO AO DIAGNÓSTICO DE  
SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE SEGMENTOS DAS CARTAS DINAMOMÉTRICAS**

Dissertação aprovada no Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia para obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Aprovada em 29 de agosto de 2014.

**Banca Examinadora**

Leizer Schnitman – Orientador

  
Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil.  
Universidade Federal da Bahia

Angelo Amâncio Duarte – Examinador Interno

  
Doutor em Ciência da Computação pela Universidad Autónoma de Barcelona, Espanha.  
Universidade Estadual de Feira de Santana

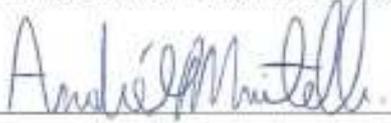
José Francisco dos Santos Corrêa – Examinador Externo

  
Mestre em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil.  
PETROBRAS S/A

Manuel de A. Barreto Filho – Examinador Externo

  
Doutor de Engenharia de Petróleo pela The University of Texas at Austin, Estados Unidos.  
PETROBRAS S/A

André Laurindo Maitelli – Examinador Externo

  
Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil.  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

A Galdir Damasceno Reges (*in memoriam*) e Maria de Fátima Cebin Reges, pais queridos,  
que me ensinaram desde cedo o valor da criatividade e do aprendizado.

A meu filho Gael Reges por me reformar e não se deixar formatar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Leizer pela confiança, respeito, paciência e por me guiar nos caminhos da carreira acadêmica.

Nothing Destroys a Good Idea Faster Than a Mandatory Consensus. The lowest common denominator is never a high standard.

Nada destrói uma boa ideia mais rápido que um consenso mandatório. O denominador comum nunca é um padrão alto.

Jessica Hagy

## RESUMO

Este trabalho propõe uma nova abordagem para o suporte ao diagnóstico dos Sistemas de Bombeio Mecânico através das Cartas Dinamométricas de Fundo, pela análise de segmentos entre os pontos aproximados de abertura e fechamento identificados nas Cartas.

Apesar da proposta de diagnóstico automático do Sistema de Bombeio Mecânico usando Cartas Dinamométricas ter aparecido em 1936, não há solução computacional padrão até o momento. Geralmente as Cartas Dinamométricas são analisadas por sua forma como um todo para reconhecimento de anomalias na operação de bombeio. Trabalhos recentes usaram segmentação das Cartas Dinamométricas para análise com resultados promissores, mas tratando os segmentos em conjunto e não isoladamente. Em geral estes trabalhos não oferecem informação quantitativa de severidade das anomalias diagnosticadas, não reconhecem anomalias concomitantes e são restritos a Cartas Dinamométricas de poucas condições de bombeio conhecidas. Este trabalho propõe uma abordagem que oferece resultados de diagnósticos de anomalias concomitantes, é aplicável a qualquer Carta Dinamométrica, e ainda potencializa a quantificação da severidade das condições de bombeio reconhecidas. É apresentada uma análise da forma das classes de condições de bombeio representadas nas Cartas Dinamométricas de Fundo (CDF), especialmente quanto ao comportamento dos segmentos entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas. Um estudo de análise de forma na área de reconhecimento de padrões é desenvolvido e um novo método de identificação dos pontos de abertura e fechamento das válvulas é apresentado para a segmentação das CDFs através de aproximação poligonal. Em seguida, o trabalho apresenta testes de classificação com os segmentos para todas as classes de CDFs relevantes usando lógica *Fuzzy* e estatísticas de curvatura dos segmentos entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas nas CDFs. Os resultados apresentados demonstram o grande potencial da nova abordagem apresentada, oferecendo resultados qualitativos, potencializando análises quantitativas e o reconhecimento de condições de bombeio concomitantes.

**Palavras Chaves:** reconhecimento de padrões, análise de forma, cartas dinamométricas, bombeio mecânico, *fuzzy*.

## **ABSTRACT**

This work proposes a new approach to support the diagnosing of the Sucker Rod Pump Systems through Downhole Dynamometer Cards, by analyzing segments between the points of opening and closing valves identified in Cards. Although the idea for automatic fault diagnosis in Sucker Rod Oil Pumping Systems using Dynamometer Cards has started in 1936, there is no standard computational solution yet. The Dynamometer Cards are generally analyzed by their shape as a whole to recognize anomalies in the pump operation. Recent papers have used segmentation of the Dynamometer Cards for analyzing with promising results, but treating the segments together and not singly. In general, these studies did not provide any quantitative information of severity of the anomalies diagnosed, don't recognize concomitant anomalies and are restricted to Dynamometer Cards from a few pumping conditions. This paper proposes an approach that can provide diagnoses of concomitant anomalies, is applicable to any Dynamometer Card and potentiates the quantification of pumping conditions severities. An analysis of the shape of the pumping condition classes represented in the Downhole Dynamometer Cards (DDC), especially regarding the behavior of segments between the valve opening and closing points is presented. A survey of shape analysis in pattern recognition field is developed and a new method of identifying the valve opening and closing points is presented for the segmentation of the DDC through polygonal approximation. Then the paper presents classification tests from segments for the classes of DDC using Fuzzy logic fed with curvature statistics from the segments between the valve opening and closing points. The results demonstrate the great potential of the proposed method, providing qualitative results, allowing quantitative analyses and the recognition of concomitant pumping conditions.

**Key Words:** shape analysis, dynamometer cards, pattern recognition, sucker rod pump, fuzzy

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Sistema de Bombeio Mecânico. Fonte: Bezerra, 2010. ....	20
Figura 1-2: Exemplos de Cartas Dinamométricas de diversas condições de bombeio: NUPRO 1 – Poço Surgente (aceleração de fluido), NUPRO 2 – Normal com ancoragem, NUPRO 3 – Fricção, NUPRO 4 – Normal sem ancoragem, NUPRO 5 – Pancada de Fluido Suave, NUPRO 6 - Pancada de Fluido severa. Fonte: (KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991). ....	21
Figura 1-3: Exemplos de CDF da classe Pancada de Fluido. Importante considerar que há formas intermediárias entre os exemplos apresentados, e possivelmente formas mais extremas: a – pancada de fluido suave com coluna não ancorada; b – pancada de fluido severa com coluna não ancorada; c – pancada de fluido severa com coluna ancorada; d – pancada de fluido muito severa com coluna ancorada; e – pancada de fluido muito severa com coluna não ancorada. ....	23
Figura 2-1: Sistema de Bombeio Mecânico. Adaptado de TAKÁCS, 2003. ....	27
Figura 2-2: Bomba de Fundo tubular. Fonte: Bezerra, 2010. ....	29
Figura 2-3: Etapas de Bombeio. Fonte: Bezerra, 2010. ....	30
Figura 2-4: Exemplo de Carta Dinamométrica de Superfície. Fonte: BARRETO FILHO, 1993. ....	32
Figura 2-5: CDF de uma condição de bombeio ideal, com sentido do deslocamento do pistão demarcado pelas setas, círculos indicando início e fim dos segmentos ascendente e descende, sendo o início do segmento ascendente demarcado pelo círculo próximo de A. A – fechamento da Válvula de Passeio; B – Abertura da Válvula de Pé; C – fechamento da Válvula de Pé; D – abertura da Válvula de Passeio. Fonte: Bezerra, 2010. ....	32
Figura 2-6: CDF exemplo de uma condição de bombeio com camisa não ancorada. Adaptado de HUA; XUNMING, 2011. ....	33
Figura 2-7: CDF da classe Normal. Fonte: Bezerra, 2010. ....	36
Figura 2-8: CDF da classe Normal com pontos de abertura e fechamento de válvulas demarcados: a – bomba cheia com coluna de tubos ancorada; b – bomba cheia com coluna não ancorada. ....	37
Figura 2-9: A classe de Ancoragem Deficiente. Adaptado de Bezerra, 2010. ....	38

Figura 2-10: Exemplos de CDF da classe Ancoragem Deficiente .....	38
Figura 2-11: CDF da classe Pancada de Fluido e interpretação de eventos em seu contorno. Adaptado: Bezerra, 2010.....	39
Figura 2-12: Exemplos de CDF da classe Pancada de Fluido: a – pancada de fluido suave com coluna não ancorada; b – pancada de fluido severa com coluna não ancorada; c – pancada de fluido severa com coluna ancorada; d – pancada de fluido muito severa com coluna ancorada; e – pancada de fluido muito severa com coluna não ancorada. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.....	40
Figura 2-13: CDF da classe Interferência de Gás. Adaptado: Bezerra, 2010. ....	41
Figura 2-14: Exemplos da classe Interferência de Gás: a – interferência de gás severa; b – interferência de gás moderada; c – bloqueio de gás. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991. ....	41
Figura 2-15: CDF com a classe Vazamento na Válvula de Pé. Adaptado: Bezerra, 2010. ....	42
Figura 2-16: Exemplos de CDF da classe Vazamento na Válvula de Pé: a – vazamento severo na Válvula de Pé; b – vazamento moderado na Válvula de Pé; c – vazamento severo na Válvula de Pé. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.....	43
Figura 2-17: CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio. Adaptado: Bezerra, 2010. ...	44
Figura 2-18: Exemplos de CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio: a – vazamento severo na Válvula de Passeio; b – Vazamento na Válvula de Passeio e coluna de tubos não ancorada. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991. ....	44
Figura 2-19: CDF da classe Batida na Parte Superior da Bomba. Adaptado: Bezerra, 2010. .	45
Figura 2-20: CDF da classe Batida na Parte Inferior da Bomba. Adaptado: Bezerra, 2010....	45
Figura 2-21: CDF da classe Camisa Abaulada. Fonte: Bezerra, 2010.....	46
Figura 2-22: CDF da classe Camisa Desgastada. Fonte: Bezerra, 2010.....	46
Figura 2-23: Exemplo da classe Poço Surgente. Adaptado de Bezerra, 2010. ....	47
Figura 2-24: CDF da classe Pistão Preso: Fonte: Bezerra, 2010.....	47
Figura 2-25: CDF da classe Válvula de Pé Emperrada. Fonte: Bezerra, 2010. ....	48
Figura 2-26: CDF da classe Fricção. Adaptado de Bezerra, 2010.....	48

Figura 2-27: CDF da classe Bomba Gasta. Fonte: Bezerra, 2010. ....	49
Figura 2-28: CDF da classe Haste Partida. Fonte: Bezerra, 2010. ....	49
Figura 2-29: Extrator de características de Bezerra, que divide os segmentos ascendente e descendente da CDF em I intervalos, e interpola os pontos dentro deles para gerar as características $c_i$ que serão usadas na rede neural artificial. Fonte: Bezerra, 2010. ....	51
Figura 2-30: Exemplo da segmentação das Cartas Dinamométricas realizada no trabalho de Hua e Xumming, para a identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas. Fonte: Hua e Xumming, 2011. ....	52
Figura 3-1: Exemplo de classificação de duas classes predefinidas, a classe A (círculo) e a classe B (cruz). Fonte: Theodoridis e Koutroumbas, 2009. ....	55
Figura 3-2: Exemplo de <i>clustering</i> aplicado a uma figura com diversos tipos de solo a esquerda e o resultado à direita. No clustering as classes de agrupamento não são predefinidas e o sistema cria os grupos por semelhança entre as características por ele processadas. Fonte: Theodoridis e Koutroumbas, 2009. ....	55
Figura 3-3: Os estágios básicos de desenvolvimento de um sistema de classificação. Adaptado de THEODORIDIS; KOUTROUMBAS, 2009. ....	56
Figura 3-4: Imagem de uma face com dimensões reduzidas para redução de complexidade. Fonte: (CHITALIYA; TRIVEDI, 2010). ....	57
Figura 3-5: Classificação de métodos de análise de forma baseados em contorno. Adaptado de Zhang & Lu, 2004. ....	59
Figura 3-6: Códigos de sentidos de <i>Chain Code</i> : a – 4-directional; b – 8-directional. ....	61
Figura 3-7: Exemplos de <i>Chain Code</i> de dois contornos. Fonte: Junding & Heli, 2009 (JUNDING; HELI, 2009). ....	62
Figura 3-8: Exemplo de modificação de utilização de pontos adjacentes como vetor de coordenadas. À esquerda pontos adjacentes usados como vetores base. À direita demais pontos transportados para o sistema de coordenadas dos pontos base. Fonte Gary & Mehrotra, 1995. ....	63
Figura 3-9: (a) forma de um cavalo; (b) a forma é decomposta nos pontos de curvatura mínima. Cada curva entre os pontos de curvatura mínima é armazenada como <i>tokens</i> no formato $(m_k, \theta_k)$ , sendo $m_k$ a curvatura máxima e $\theta_k$ a orientação. ....	64

Figura 4-1: Exemplo de normalização de uma CDF: a - CDF original; b – CDF após normalização.....	69
Figura 4-2: Demonstração de análise angular dos segmentos das Cartas Dinamométricas.....	70
Figura 4-3: Interpretação aproximada dos quatro estágios do ciclo de bombeio em CDFs de diferentes condições de bombeio.....	70
Figura 4-4: Exemplos de CDFs de condições <i>pump off</i> .....	71
Figura 4-5: Polígonos predefinidos por análise para a aproximação poligonal de qualquer CDF.....	73
Figura 4-6: Demonstração de <i>Chain Code</i> 4-connected.....	73
Figura 4-7: Exemplo de normalização de uma CDF: a - CDF original; b – CDF após normalização.....	74
Figura 4-8: Exemplo de distribuição equidistante dos pontos da CDF original (a) e resultado em (b). .....	75
Figura 4-9: CDF com ângulos exibidos a cada 10 pontos como exemplo.....	76
Figura 4-10: Sentido de cada ponto de um CDF através do <i>Chain Code</i> 4-connected.....	76
Figura 4-11: Polígonos predefinidos na aproximação poligonal das Cartas Dinamométricas de Fundo e as <i>Strings</i> que os representam. ....	77
Figura 4-12: Formas possíveis dos polígonos predefinidos na aproximação das CDFs: a – quadrilátero similar à classe Vazamento na Válvula de Passeio; b – hexágono similar à classe Pancada de Fluido com indícios de Vazamento na Válvula de Pé e Interferência de Gás; c – quadrilátero similar à classe Vazamento na Válvula de Pé; d – Hexágono similar à classe Pancada de Fluido com indício de Poço Surgente.....	78
Figura 4-13: Processo de filtragem para decomposição em polígono de CDF da classe Pancada de Fluido de um poço real: a – CDF original com <i>Chain Code</i> e <i>String</i> ; b – CDF filtrada até que a <i>String</i> seja idêntica à <i>String</i> de um dos polígonos pré-definidos.....	79
Figura 4-14: Processo de filtragem para aproximação poligonal de CDF artificial de Vazamento da Válvula de Passeio: a – CDF original com <i>Chain Code</i> e <i>String</i> ; b – CDF filtrada até aproximação poligonal, com <i>Chain Code</i> e <i>String</i> . ....	80
Figura 4-15: Fluxograma de identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas.	81

Figura 4-16: CDF de diversas classes com os pontos de abertura e fechamento de válvulas demarcados conforme resultado do algoritmo deste trabalho. ....	82
Figura 4-17: Exemplos de segmentos, a e b, com valores de <i>Bending Energy</i> Similares. ....	85
Figura 4-18: Comparação do intervalo interquartil e derivados sobre uma distribuição normal. Q2 é a mediana ( <i>Median</i> ). Fonte: Wikipedia. ....	87
Figura 4-19: Variável de entrada do ângulo médio do segmento 1 e as funções de pertinência de cada termo linguístico.....	90
Figura 4-20: Variável de entrada do <i>Negative Bending Energy</i> do segmento 2 e as funções de pertinência de cada termo linguístico.....	91
Figura 4-21: Variável de saída do sistema <i>Fuzzy</i> de análise de normalidade e as funções triangulares de pertinência dos dois termos linguísticos usados, anormal e normal. ....	91
Figura 4-22: Fluxograma do processo de análise de normalidade das CDF.....	92
Figura 4-23: CDF da base de dados pré-classificadas como Normal e que tiveram saída abaixo de 0,5 no sistema <i>Fuzzy</i> criado, portanto consideradas anormais.....	94
Figura 4-24: CDF pré-classificada em base de dados como sendo da classe Batida na Parte Superior, portanto anormal, mas que foi considerada da classe Normal pelo sistema <i>Fuzzy</i> criado.....	95
Figura 4-25: CDF pré-classificada na classe Interferência de Gás, mas que teve saída menor 0,5 no sistema de <i>Fuzzy</i> criado para inferir Interferência de Gás. A mesma apresenta anomalia no segmento 1 que indica também Ancoragem Deficiente.....	97
Figura 4-26: CDF pré-classificada na classe Pancada de Fluido, mas que teve saída maior que 0,5 no sistema de <i>Fuzzy</i> criado para inferir Interferência de Gás. O ângulo médio dos segmentos 1 e 3 parecem estar no limite de reconhecimento entre Normal e Interferência de Gás. Talvez a mesma seja de Pancada de Fluido e Interferência de Gás.....	98
Figura 4-27: Uma das duas CDF pré-classificadas como de Vazamento na Válvula de Passeio que apresenta deformidade compatível também com Ancoragem Deficiente e que foi considerada com pertinência abaixo de 0,5 pelo classificador desenvolvido. ....	99
Figura 4-28: CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio gerada artificialmente. ....	100
Figura 4-29: CDF artificial da classe Fricção com pontos de abertura e fechamento de válvulas identificados e sentido de cálculo das diferenças angulares indicado.....	101

Figura 4-30: CDF da classe Normal identificadas com Ancoragem Deficiente. ....	102
Figura 4-31: CDF da classe Pancada de Fluido identificadas com Ancoragem Deficiente...	102
Figura 4-32: CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio identificadas com Ancoragem Deficiente. ....	103
Figura 4-33: CDF pré-classificadas como Pancada de Fluido, mas que não foram inferidas como tal pelo algoritmo criado e apresentam formas incompatíveis com a descrição da anomalia. ....	104
Figura 4-34: CDF da base de dados pré-classificadas como de Batidas na Parte Superior, mas apenas a CDF (a) tem efetivamente uma subida de carga no fim do segmento 2, a outras não. ....	105
Figura 4-35: CDF pré-classificada como Normal e identificada com Batida na Parte Inferior. ....	106
Figura 4-36: CDF pré-classificadas como Pancada de Fluido e que foram identificadas com Batida na Parte Inferior. ....	107
Figura 4-37: CDF Artificial da classe Camisa Abaulada.....	108
Figura 4-38: CDF artificial da classe Camisa Desgastada. ....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	Artificial Neural Network
Arcos	Função inversa do cosseno
BF	Bomba de Fundo
BE	<i>Bending Energy</i>
CCH	<i>Chain Code Histogram</i>
CDF	Carta Dinamométrica de Fundo
CDS	Carta Dinamométrica de Superfície
DDC	Downhole Dynamometer Card
HB	Hastes de Bombeio
IQR	Intervalo Interquartil
Lbf	Libras-força
NBE	<i>Negative Bending Energy</i>
NCCH	<i>Normalized Chain Code Histogram</i>
PC	Pressão dentro da Camisa
PBE	<i>Positive Bending Energy</i>
Pol	Polegadas
RGO	Razão gás óleo
SBM	Sistema de Bombeio Mecânico
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
Sign	Função sinal
SOM	<i>Self-Organizing Maps</i>
UB	Unidade de Bombeio

## LISTA DE VÁRIAVEIS

$A$	Área
$\vec{a}$	Vetor entre dois pontos
$ang_n$	Ângulo do vetor formado pelo enésimo ponto e o ponto anterior
$c_n$	Enésimo valor de carga
$c_{max}$	Valor máximo de carga
$c_{min}$	Valor mínimo de carga
$code_n$	<i>Chain Code</i> de $a_n$
$comp$	Comprimento total da Carta Dinamométrica
$d_n$	Enésimo valor de deslocamento
$d_{max}$	Valor máximo de deslocamento
$d_{min}$	Valor mínimo de deslocamento
$dep$	Distância entre pontos para normalização de distâncias
$dist_n$	Distância entre enésimo ponto e o ponto anterior
$i, j, k, n$	Índices inteiros
$K(p)$	Função da curvatura
$ndist_n$	Distância do enésimo ponto e o ponto inicial de uma carta com distâncias entre pontos normalizadas
$P$	Perímetro
$P_i$	I-ésimo ponto
$Q1$	Mediana do subconjunto de baixo da mediana de um conjunto de dados
$Q2$	Mediana de um conjunto de dados
$Q3$	Mediana do subconjunto de cima da mediana de um conjunto de dados
$S$	<i>String</i> de um <i>Chain Code</i>
$S_i$	I-ésimo valor de um <i>Chain Code</i>
$S_l$	Curso da Haste Polida
$S_p$	Curso do Pistão

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	20
1.1	Motivação.....	21
1.2	Principais contribuições .....	24
1.3	Mapa de capítulos.....	25
2	Análise do Sistema de Bombeio Mecânico de Petróleo através das Cartas Dinamométricas de Fundo.....	27
2.1	O Sistema de Bombeio Mecânico .....	27
2.1.1	Principais componentes do sistema .....	28
2.2	Manutenção do SBM .....	31
2.2.1	Carta Dinamométrica de Superfície.....	31
2.2.2	Carta Dinamométrica de Fundo.....	32
2.3	As condições de bombeio representadas nas CDF .....	35
2.3.1	A classe Normal.....	36
2.3.2	Ancoragem Deficiente .....	37
2.3.3	Pancada de Fluido.....	38
2.3.4	Interferência de Gás .....	40
2.3.5	Vazamento na Válvula de Pé.....	42
2.3.6	Vazamento na Válvula de Passeio .....	43
2.3.7	Batida na parte superior da Bomba.....	44
2.3.8	Batida na Parte Inferior da Bomba.....	45
2.3.9	Camisa Abaulada .....	45
2.3.10	Camisa Desgastada ou Furada .....	46
2.3.11	Poço Surgente .....	46
2.3.12	Pistão Preso.....	47
2.3.13	Válvula de Pé Emperrada Aberta.....	47
2.3.14	Fricção.....	48
2.3.15	Bomba Gasta.....	48
2.3.16	Haste Partida.....	49
2.4	Estado da arte do diagnóstico automático do SBM por Cartas Dinamométricas .....	50

3	Reconhecimento de padrões aplicado a contornos de formas .....	55
3.1	Reconhecimento de Padrões.....	55
3.2	Pré-processamento .....	56
3.3	Análise de Forma.....	57
3.4	Descritores de forma baseados no contorno global .....	59
3.5	Descritores de forma baseados na estrutura do contorno.....	60
3.6	Discussão .....	64
4	A abordagem de análise de segmentos das Cartas Dinamométricas de Fundo para suporte ao diagnóstico do Sistema de Bombeio Mecânico .....	67
4.1	Segmentação da CDF pela identificação aproximada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas.....	67
4.1.1	Forma geral das Cartas Dinamométricas de Fundo e seus segmentos....	68
4.1.2	Descrição de forma por <i>Chain Code</i> .....	73
4.1.3	Aproximação poligonal.....	77
4.1.4	Extração dos pontos de abertura e fechamento das válvulas.....	80
4.2	Testes de classificação das CDFs pela análise de segmentos .....	83
4.2.1	Extração de características dos segmentos e análise de normalidade de CDF	85
4.2.2	Analisadores de anomalias através de características dos segmentos principais da CDF .....	96
4.2.3	Classificadores baseados em subsegmentos dos segmentos principais das CDFs	101
5	Conclusão .....	110
6	Referências.....	112

## 1 Introdução

O Sistema de Bombeio Mecânico (Figura 1-1) é o método mais comum de elevação artificial de petróleo (THOMAS, 2001). O sistema executa um movimento alternado para bombear o petróleo, e a cada ciclo desse movimento é gerada uma curva representando o deslocamento e a carga das hastes de bombeio a cada instante do ciclo, a essa curva é dada o nome da Carta Dinamométrica.

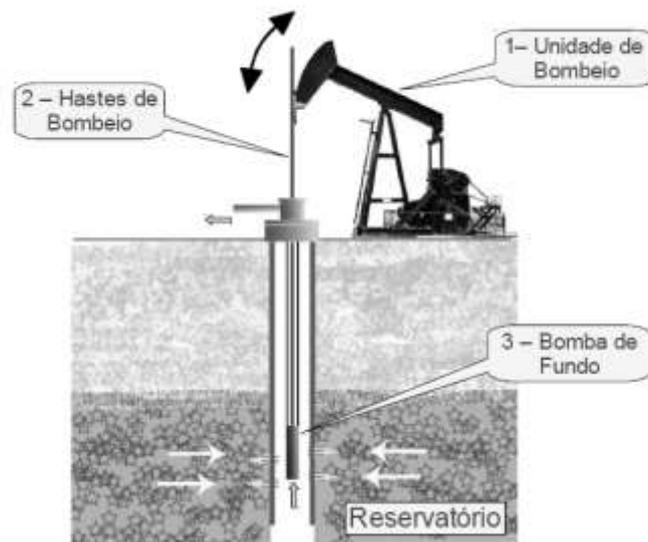


Figura 1-1: Sistema de Bombeio Mecânico. Fonte: Bezerra, 2010.

A Carta Dinamométrica é principal a ferramenta de monitoramento Sistema de Bombeio Mecânico (SBM) (TAKÁCS, 2003). Uma Carta Dinamométrica representando uma condição de bombeio considerada normal tem aproximadamente a forma de um retângulo e distorções nesta forma podem indicar anomalias no SBM (Figura 1-2).

A utilização de um sistema de diagnóstico automatizado usando as Cartas Dinamométricas de Fundo permite o reconhecimento de diversos problemas muito específicos na operação de bombeio, inclusive via monitoramento à distância, além de permitir a tomada de ações corretivas e preventivas com impacto direto na produtividade e por consequência no custo do petróleo.

O estudo das Cartas Dinamométricas começou em 1936 (GILBERT, 1936), e até o momento não existe consenso quanto ao método ideal de realizar a análise computacional do SBM através das Cartas Dinamométricas. Diversos trabalhos ainda são gerados para apresentar novos métodos ou aperfeiçoar os atuais, e ampliar a quantidade de anomalias que podem ser reconhecidas.

Este trabalho apresenta uma nova abordagem de análise da forma das Cartas Dinamométricas para suporte ao diagnóstico do Sistema de Bombeio Mecânico, baseada na análise de segmentos das Cartas. Esta abordagem supera as limitações da abordagem de equiparação de forma geral, tradicionalmente usada e que será explicada a seguir. Os resultados de testes de classificação indicam potencial de exatidão superior aos apresentados no estado da arte, e ainda oferecem identificação de anomalias concomitantes ou limítrofes além de potencializar resultados quantitativos de severidade para as condições de bombeio.

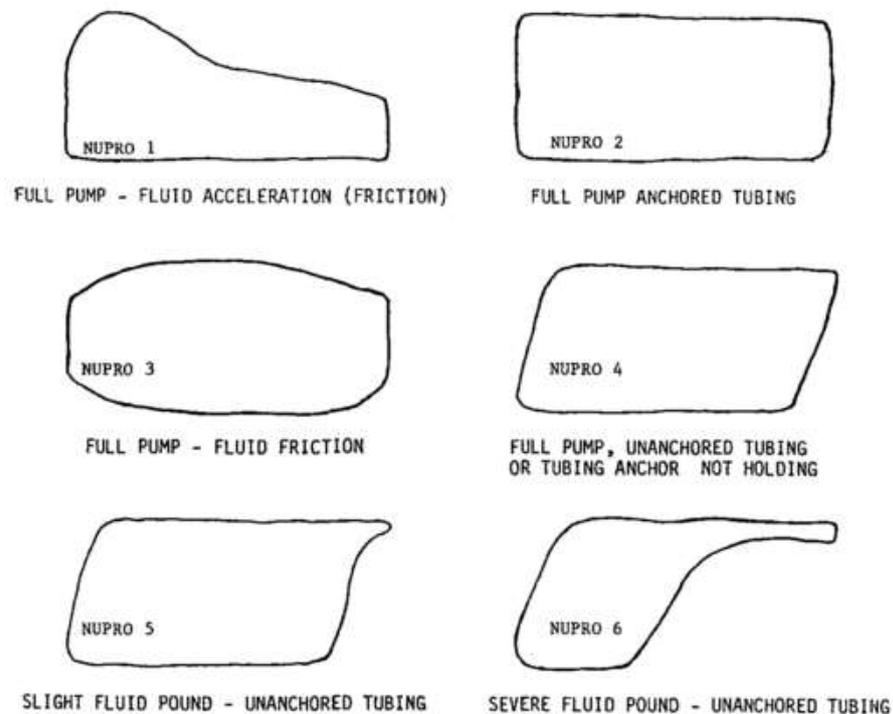


Figura 1-2: Exemplos de Cartas Dinamométricas de diversas condições de bombeio: NUPRO 1 – Poço Surgente (aceleração de fluido), NUPRO 2 – Normal com ancoragem, NUPRO 3 – Fricção, NUPRO 4 – Normal sem ancoragem, NUPRO 5 – Pancada de Fluido Suave, NUPRO 6 - Pancada de Fluido severa. Fonte: (KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991).

## 1.1 Motivação

O Sistema de Bombeio Mecânico é largamente utilizado por diversas empresas de extração de petróleo por todo o mundo, os quais representam potenciais interessados nos resultados desta pesquisa e no licenciamento de patentes geradas.

O processo de diagnóstico do SBM através das Cartas Dinamométricas pode ser considerado um processo de classificação. As classes são as condições de bombeio reconhecíveis nas formas das Cartas Dinamométricas, sendo um conjunto formado pela

condição de bombeio Normal e diversas condições de bombeio causadas por anomalias na operação.

Muitos métodos analíticos avançados foram usados na classificação das Cartas Dinamométricas em diversos trabalhos, tais como sistemas hierárquicos especialistas (ABELLO; HOUANG; RUSSELL, 1993), redes neurais simbólicas (CORRÊA, 1995), redes neurais artificiais, (SOUZA; BEZERRA, 2009; XU; XU; YIN, 2007), análise de espectro de frequência (DE LIMA; GUEDES; SILVA, 2009) e *Support Vector Machines* (LI et al., 2013).

Entretanto, tais métodos resultaram em sistemas de diagnóstico que apresentam resultados apenas para parte das classes possíveis e tem resultados que podem ser melhorados. Além disso, seus resultados são em geral qualitativos e não são utilizados para prever uma anomalia ou inferir o grau de severidade de qualquer anomalia identificada (sem resultados quantitativos). Por outro lado, apesar da concomitância de anomalias no bombeio ser considerada comum, os sistemas em geral também não tratam de situações de bombeio que tenham mais de uma anomalia ocorrendo ao mesmo tempo.

A abordagem geralmente utilizada para análise e classificação das Cartas se baseia em alguma medida de similaridade entre a forma geral de uma Carta de classe desconhecida com a de Cartas previamente classificadas em uma biblioteca de equiparação. Essa abordagem tem algumas limitações importantes, e uma das mais importantes é que sua eficiência depende de grande variedade das Cartas na biblioteca pré-classificada.

As formas das Cartas de diversas condições de bombeio não são únicas, muito pelo contrário, podem variar muito, de condições mais suaves a condições mais severas, podendo inclusive apresentar formas que podem se consideradas limítrofe entre uma condição de bombeio Normal e alguma condição de bombeio anômala (Figura 1-3-a), o que pode tornar a classificação divergente por especialistas. É difícil estimar a quantidade de amostras de Cartas que possam efetivamente representar toda a variedade de forma que as condições de bombeio diferentes podem apresentar, portanto é difícil determinar se uma quantidade é suficiente para eficiência prática do sistema final de diagnóstico.

Além disso, as Cartas Dinamométricas geradas por cada SBM variam muito pouco no tempo, gerando a mesma carta por semanas ou mesmo meses, o que faz a variedade de formas das Cartas Dinamométricas extraídas de cada poço ser muito pequena, tornando ainda mais difícil conseguir Cartas de tantas formas possíveis. Essa grande variedade de formas possíveis torna muito difícil criar uma coleção de amostras de Cartas Dinamométricas que represente eficientemente cada condição de bombeio. O tamanho da biblioteca é uma das

causas para que tantos trabalhos apresentados na área sejam limitados a apenas 5 condições de bombeio possíveis, de um conjunto geralmente citado como de 17.

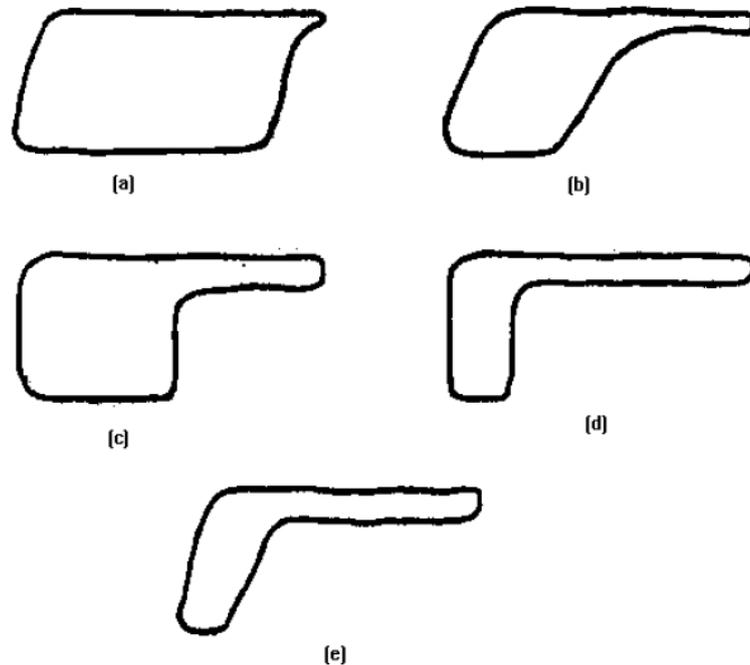


Figura 1-3: Exemplos de CDF da classe Pancada de Fluido. Importante considerar que há formas intermediárias entre os exemplos apresentados, e possivelmente formas mais extremas: a – Pancada de Fluido suave com coluna não ancorada; b – Pancada de Fluido severa com coluna não ancorada; c – Pancada de Fluido severa com coluna ancorada; d – Pancada de Fluido muito severa com coluna ancorada; e – Pancada de Fluido muito severa com coluna não ancorada.

Outra limitação da abordagem de análise por equiparação da forma geral é oferecer como resultado apenas uma classe, enquanto o bombeio pode apresentar mais de uma anomalia simultaneamente. Os classificadores que usam métodos de medidas de similaridade da forma podem oferecer como resultado um valor indicativo de similaridade. Este valor informa o grau de similaridade de uma Carta de classe desconhecida com as classes de Cartas previamente classificadas da biblioteca usada na equiparação. Essa medida pode indicar a similaridade máxima encontrada ou algo como uma média de similaridade com todas elas. Apesar da apresentação de valores de similaridade para várias classes, o resultado será baseado no valor máximo de similaridade, e mesmo que uma Carta represente uma situação limítrofe entre duas classes de condições de bombeio, portanto tendo valores de similaridade muito parecidos para ambas, o resultado será simplesmente a condição mais similar. Uma lista de classes por ordem de similaridade pode ser apresentada também, mas a abordagem não pode afirmar se o resultado indica condições de bombeio concomitantes, ou apenas uma condição de bombeio que se parece com outras ou ainda uma condição de bombeio de

transição entre a classe Normal e uma classe de condição de bombeio anômala como a Pancada de Fluido (Figura 1-3-a).

Os resultados em geral apenas qualitativos, ou seja, sem indicação de severidade das condições de bombeio, também indicam outra limitação da abordagem geralmente utilizada. As Cartas Dinamométricas na literatura têm em muitos casos informação de severidade associada de forma qualitativa como uma subclasse, por exemplo, “Pancada de Fluido Severa” ou ainda “Pancada de Fluido Suave” (Figura 1-2), e assim a medida de similaridade poderia indicar de forma qualitativa o grau de severidade da condição de bombeio representada em uma Carta Dinamométrica. Em geral as bibliotecas de equiparação só informam a condição geral de bombeio sem indicação de severidade e os resultados dos trabalhos também. A inferência de quanto uma condição de bombeio anômala é mais severa, ou mais próxima de algum limite de normalidade, ou seja, inferir uma informação quantitativa da condição de bombeio permitiria análises e intervenções mais precisas na operação, talvez até de forma a perceber o princípio de uma anomalia e saná-la antes de se tornar importante.

Resumindo, são limitações muito importantes da abordagem de comparação de forma geral das Cartas Dinamométricas, tradicionalmente no diagnóstico computacional de Sistemas de Bombeio Mecânico: a dependência de uma grande quantidade de amostras de Cartas Dinamométricas de poços reais e que são difíceis de adquirir, os resultados que apresentam apenas uma classe de condição de bombeio onde condições de bombeio de transição e anomalias concomitantes são comuns, e os resultados apenas qualitativos que não indicam a severidade das anomalias e que assim diminuem o potencial de análise e predição no sistema.

Esse trabalho então foi motivado pela busca de uma nova abordagem para o problema, que não sofra das mesmas limitações e ofereça resultados com exatidão igual ou superior à abordagem tradicional.

## **1.2 Principais contribuições**

A nova abordagem apresentada neste trabalho supera as limitações da abordagem equiparação de forma geral, tradicionalmente usada, apresentando ainda resultados de classificação que indicam potencial de exatidão superior aos apresentados no estado da arte.

As principais contribuições apresentadas por este trabalho são:

- Uma nova abordagem de análise da forma das Cartas Dinamométricas para diagnóstico do Sistema de Bombeio Mecânico baseada na análise de segmentos.
- Um estudo de métodos de reconhecimento de padrões pela análise de forma de contornos e sua aplicabilidade na classificação das Cartas Dinamométricas.
- Uma análise das formas das condições de bombeio representadas nas Cartas Dinamométricas, baseada na análise de segmentos gerados pela identificação estimada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas, com inferências de severidade para algumas delas a depender de suas características.
- Um novo algoritmo de segmentação das Cartas Dinamométricas pela identificação estimada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas.
- Uma nova medida de distorção da forma baseada em curvatura capaz de medir convexidade e concavidade (*Positive Bending Energy e Negative Bending Energy*).
- Uma proposição de métodos de classificação para todas as condições de bombeio, sendo 5 condições de bombeio classificadas por lógica simples (BEZERRA, 2010), e 12 pela análise de estatísticas de curvatura de segmentos de Cartas de poços reais e Cartas artificiais geradas a partir de figuras da bibliografia, processadas através de lógica *Fuzzy*, oferecendo inferência de severidade para algumas delas.

### 1.3 Mapa de capítulos

Essa dissertação tem 4 capítulos e os próximos são organizados como descrito abaixo.

- Capítulo 2. O Sistema de Bombeio Mecânico e o problema de sua análise através das Cartas Dinamométricas de Fundo são apresentados assim como uma revisão de diversos trabalhos que contribuíram com o atual estado da técnica.
- Capítulo 3. As Cartas Dinamométricas de Fundo são um contorno fechado e neste capítulo é apresentado um estudo sobre reconhecimento de padrões pela análise de formas em contornos, fundamentando a nova abordagem que será proposta no capítulo seguinte.

- Capítulo 4. A nova abordagem de análise das Cartas Dinamométricas a partir de seus segmentos para diagnóstico do Sistema de Bombeio Mecânico é apresentada, aplicando estratégias fundamentadas no estudo de análise de formas. Para aplicar a nova abordagem, um método de segmentação das Cartas a partir da identificação aproximada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas é demonstrado e resultados de testes são apresentados. Com a segmentação solucionada, métodos individuais de análise de cada condição de bombeio identificável nas Cartas Dinamométricas são apresentados, e testes de classificação são apresentados demonstrando a viabilidade e potencial da nova abordagem.

## 2 Análise do Sistema de Bombeio Mecânico de Petróleo através das Cartas Dinamométricas de Fundo

### 2.1 O Sistema de Bombeio Mecânico

O petróleo é todo e qualquer hidrocarboneto líquido em seu estado natural, a exemplo do óleo cru, encontrado em uma configuração geológica de propriedades específicas denominado reservatório.

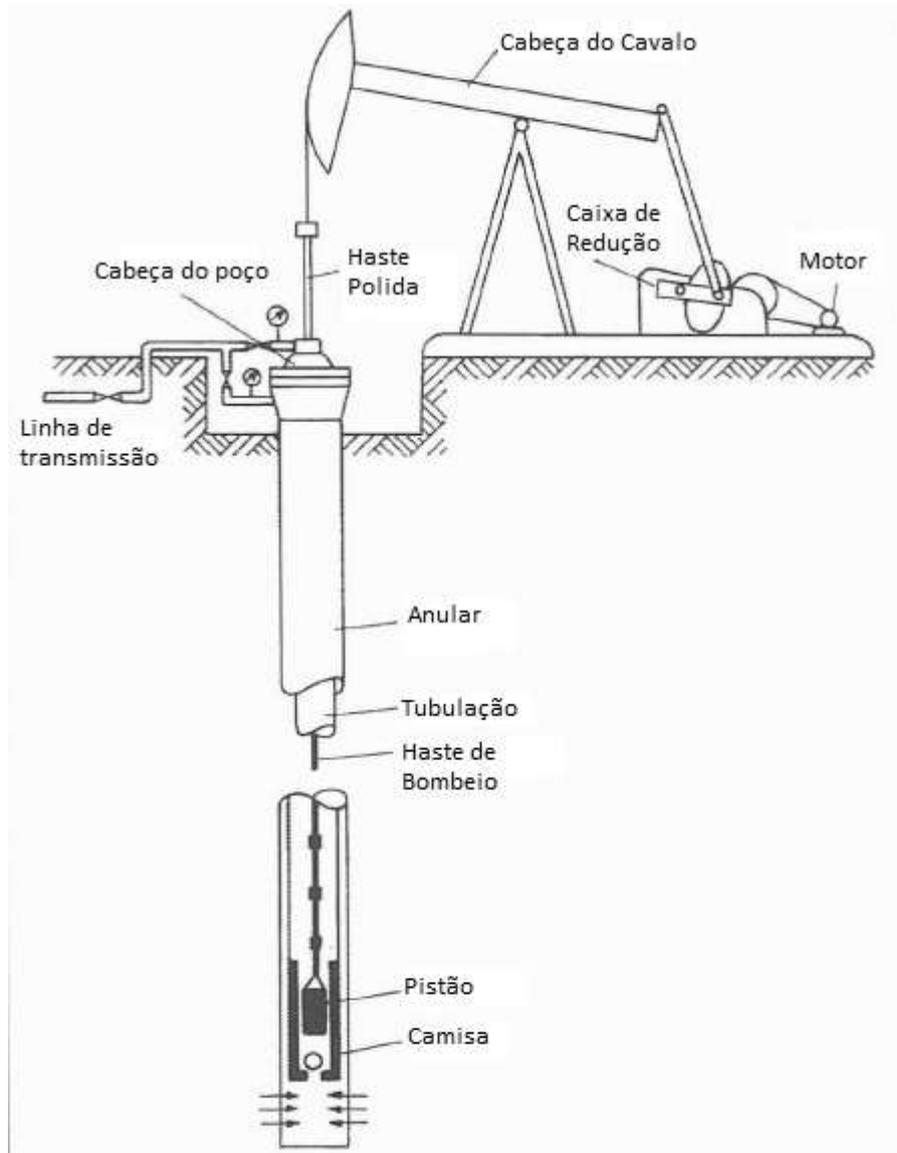


Figura 2-1: Sistema de Bombeio Mecânico. Adaptado de TAKÁCS, 2003.

Se o reservatório possuir energia suficiente, o petróleo alcançará a superfície de forma espontânea, e nesse caso o poço recebe a designação de Poço Surgente sendo o mecanismo de produção denominado Elevação Natural. Caso a energia do reservatório não

seja suficiente para conduzir o petróleo à superfície ou mesmo propiciar uma produção comercial viável, passa a existir então a necessidade de se complementar esta energia através de métodos de elevação artificial.

Em 2001 o Sistema de Bombeio Mecânico (SBM) foi considerado o mecanismo de elevação artificial mais utilizado na indústria da produção de petróleo (THOMAS, 2001).

### 2.1.1 Principais componentes do sistema

Os componentes individuais do SBM podem ser divididos em dois grupos, os de superfície e os de fundo (TAKÁCS, 2003).

Os equipamentos de superfície incluem:

- Motor que provê a força do sistema e pode ser elétrico ou a combustão.
- Caixa de redução que diminui a alta velocidade de rotação do motor para a velocidade necessária de bombeio e ao mesmo tempo aumenta o torque.
- A unidade de bombeio, uma estrutura que transforma o movimento rotatório da caixa de redução em um movimento alternado que moverá a bomba de fundo.
- Haste polida, que conecta a unidade de bombeio nas hastes de bombeio e garante que a cabeça do poço mantenha os fluidos dentro da tubulação.
- Cabeça do poço fecha o anular (revestimento do poço) e conecta a tubulação à linha de transmissão.

Os equipamentos de fundo incluem:

- Hastes de bombeio que proveem a transmissão do motor de superfície para a bomba de fundo.
- Pistão, que é a parte móvel da bomba de fundo e é conectado diretamente nas hastes de bombeio. Através de uma válvula, a Válvula de Passeio, eleva o fluido contido na tubulação durante o movimento ascendente do sistema, e permite que mais fluido entre na tubulação durante o movimento descendente.
- Camisa, parte fixa da bomba de fundo. Através de uma válvula, a Válvula de Pé, mantém o fluido contido na tubulação durante o movimento descendente do sistema, e permite que mais fluido entre na tubulação durante o movimento ascendente.

A Figura 2-1 ilustra estes componentes.

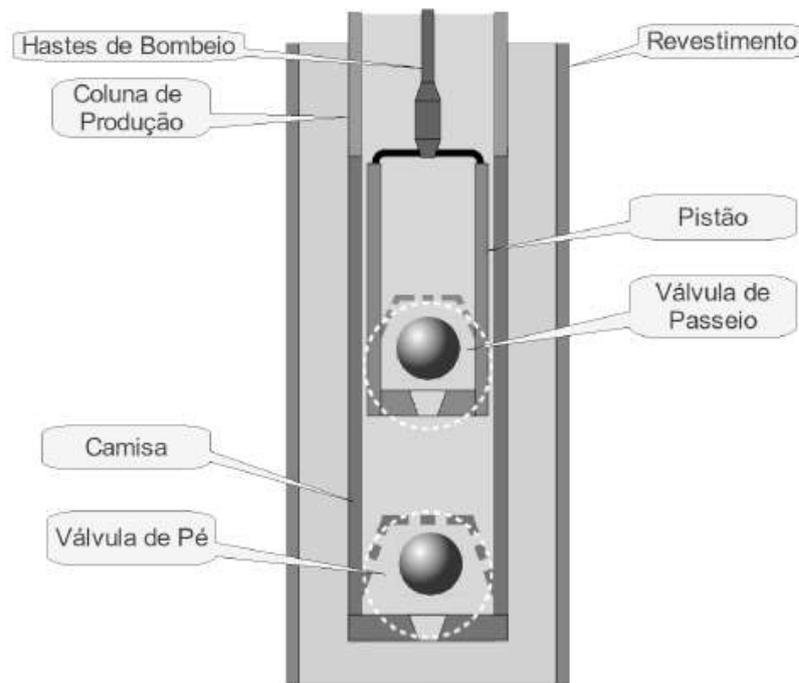


Figura 2-2: Bomba de Fundo tubular. Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.1.1.1 Funcionamento da Bomba de Fundo

A BF (Bomba de Fundo) transmite a energia mecânica do movimento alternado para o fluido multifásico (petróleo, gás, sedimentos e água).

Seus principais componentes são uma parte móvel, formada pelo pistão e a Válvula de Passeio, e uma parte fixada à coluna de produção, constituída pela camisa e a Válvula de Pé.

Na Figura 2-2 são apresentados detalhes de uma Bomba de Fundo tubular típica.

As válvulas são consideradas essenciais no SBM, pois uma operação de bombeio eficiente depende principalmente do funcionamento das válvulas de pé e passeio (TAKÁCS, 2003). As válvulas do SBM são válvulas de retenção, que permitem a passagem de fluido em apenas um sentido. Funcionam em geral no princípio de esfera sobre assento dentro de uma gaiola. Tanto o assento quanto a esfera são produzidos com grande precisão para permitir uma selagem perfeita. São projetadas para suportar corrosão e erosão, além dos impactos gerados pela operação de bombeio.

O funcionamento da Bomba de Fundo está fundamentado no diferencial de pressão presente nas válvulas de pé e de passeio. Com o deslocamento do Pistão a pressão dentro da

camisa, entre a Válvula de Pé e de Passeio, é alterada, aumentando com a descida do pistão e diminuindo com a subida. Quando a pressão dentro da camisa (PC) se torna menor que a pressão abaixo da Válvula de Pé a mesma se abre. Na descida do pistão, quando PC se tornar maior que a pressão acima da Válvula de Passeio, a Válvula de Passeio será aberta.

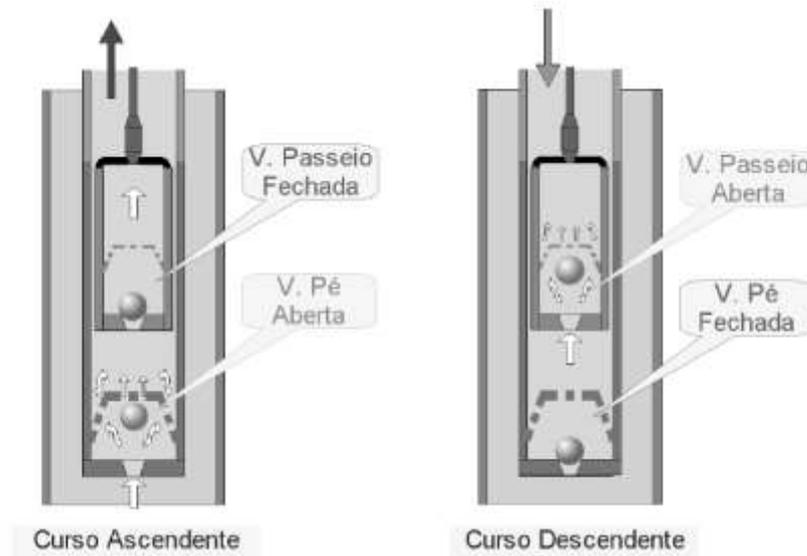


Figura 2-3: Etapas de Bombeio. Fonte: Bezerra, 2010.

A BF é um dispositivo do tipo deslocamento positivo, pois desloca um volume constante de fluido em cada ciclo de bombeio, que é realizado em duas etapas distintas (Figura 2-3):

1. Curso ascendente: nesta etapa o pistão é tracionado pelas hastes de bombeio (HB) para cima, e a pressão dentro da camisa (PC) começa a diminuir. A redução da PC faz a Válvula de Passeio se fechar quase que imediatamente no início do movimento. O volume dentro do pistão é então deslocado para a superfície ocorrendo produção de petróleo. Assim que PC se torna menor que a pressão abaixo da Válvula de Pé a mesma se abre. O espaço que é deixado na camisa é preenchido pelo fluido proveniente do poço através da Válvula de Pé.
2. Curso descendente: o pistão desloca-se pra baixo, e com fluido parando de passar da camisa para o pistão a Válvula de Pé se fecha devido a PC que começa a aumentar. Assim que PC se torna maior que a pressão acima da Válvula de Passeio a mesma se abre, permitindo que o fluido da camisa se desloque para a câmara do pistão. O mergulho da coluna de hastes no fluido da coluna de produção provoca o deslocamento do mesmo podendo ocorrer uma pequena produção na superfície.

## 2.2 Manutenção do SBM

Após sua instalação, uma rotina de acompanhamento presencial se faz necessária para o monitoramento do desempenho do sistema, o qual pode se degradar em função de falhas mecânicas e variações das características de produção do reservatório.

A periodicidade da coleta de informações sobre um determinado poço fica a cargo do gerenciamento das operações de produção. Em uma região de produção de petróleo, com inúmeros campos e poços a obtenção de informações a respeito de um único poço pode se tornar complexa. Testes que envolvam a produção de petróleo para se determinar vazões são custosos e demorados, pois envolvem a segregação do poço em uma estrutura de produção própria para testes, formada por um conjunto de válvulas (*manifold*), separador de gás, tratador de óleo e tanque de teste usualmente por um período de dezenas de horas. Neste paradigma, um poço pode passar semanas ou meses sem uma avaliação, o que justifica o emprego de outras técnicas de monitoramento.

A utilização de sistemas computacionais do tipo *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) permite o monitoramento remoto contínuo de diversas informações do poço, incluindo informações de carga e deslocamento por ciclo de bombeio, ou seja, permitem a aquisição de Cartas Dinamométricas que podem ser analisadas remotamente para avaliação do SBM sem necessidade de testes presenciais.

É a avaliação de testes com dinamômetros que embasa as tarefas mais básicas (TAKÁCS, 2003):

- Redução de custos de elevação
- Detecção e prevenção de falhas
- Melhorias na seleção de equipamentos para o SBM
- Aumento na produção do poço

### 2.2.1 Carta Dinamométrica de Superfície

A Carta Dinamométrica de Superfície é a Carta gerada no nível da superfície do SBM, e a partir dela pode ser gerada a Carta Dinamométrica de Fundo que reflete com mais clareza a situação abaixo da superfície.

Uma célula de carga é posicionada entre a cabeça de cavalo e a haste polida, suportando toda a carga que a unidade de bombeio traciona através das hastes de bombeio. A célula informa a situação de carga a cada instante juntamente com um sensor de posição das hastes de bombeio, e esses dados formam a Carta Dinamométrica de Superfície.

A Figura 2-4 mostra uma típica Carta Dinamométrica de Superfície. É tradicional obter a CDS de forma contínua e automática, via um sistema SCADA, portanto a cada ciclo de bombeio uma Carta Dinamométrica pode ser armazenada remotamente.

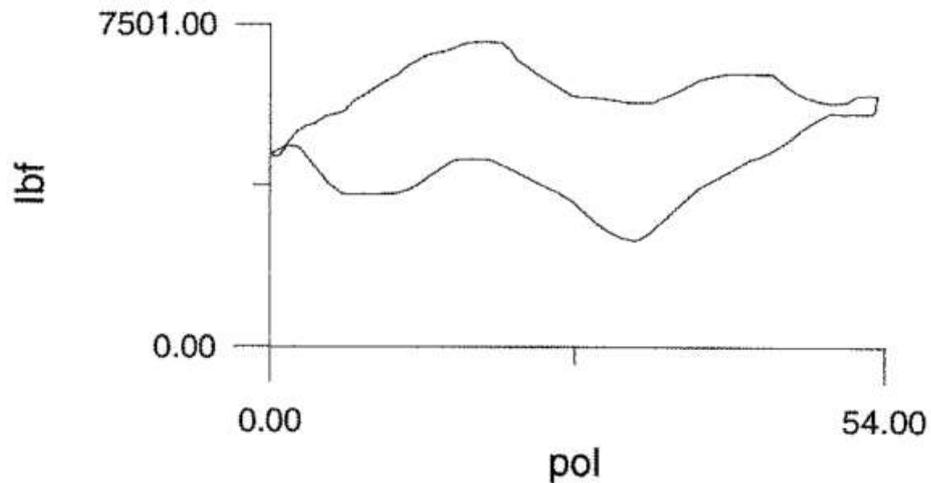


Figura 2-4: Exemplo de Carta Dinamométrica de Superfície. Fonte: BARRETO FILHO, 1993.

### 2.2.2 Carta Dinamométrica de Fundo

A Carta Dinamométrica de Fundo (CDF) é gerada resolvendo equações que filtram a CDS para remover distorções relativas à elasticidade e atrito dos materiais, e reflete com mais clareza as condições de operações relativas ao fundo do poço. O método de geração da CDF foi coberto com profundidade e aperfeiçoado por Barreto (BARRETO FILHO, 1993).

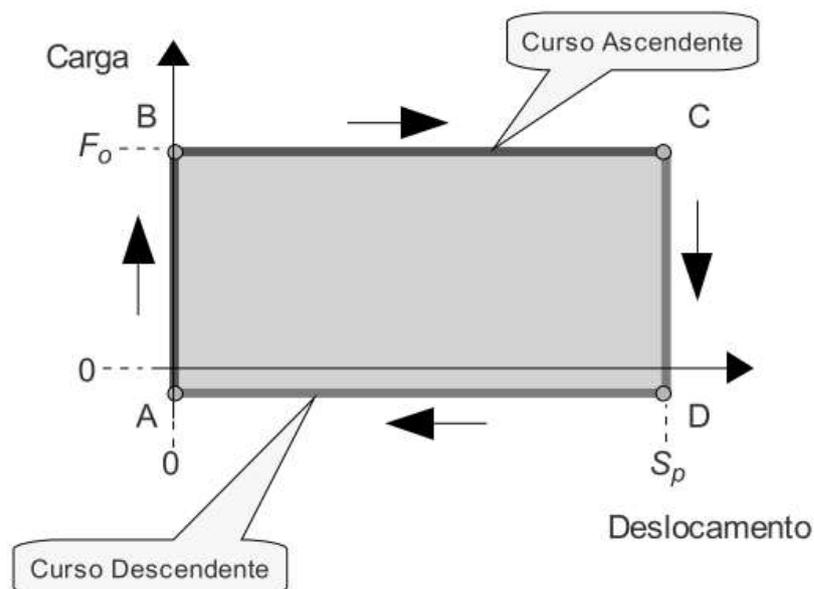


Figura 2-5: CDF de uma condição de bombeio ideal, com sentido do deslocamento do pistão demarcado pelas setas, círculos indicando início e fim dos segmentos ascendente e descendente, sendo o início do segmento

ascendente demarcado pelo círculo próximo de A. A – fechamento da Válvula de Passeio; B – Abertura da Válvula de Pé; C – fechamento da Válvula de Pé; D – abertura da Válvula de Passeio. Fonte: Bezerra, 2010.

Na Carta Dinamométrica de Fundo apresentada na Figura 2-5 é exemplificado o ciclo de bombeio ideal. Começando no ponto A e seguindo os pontos demarcados em B, C, e D onde o ciclo é reiniciado. A CDF ideal representa uma condição de bombeio com preenchimento total de fluido incompressível, bombeio cheio, sem compressão ou expansão de gás, inserida em uma coluna de produção inelástica, onde tanto a Válvula de Passeio quanto a Válvula de Pé estão funcionando perfeitamente sem vazamentos ou inércias e com pistão de peso desprezível. A curva fechada pode ser dividida facilmente em dois segmentos baseados no deslocamento do pistão, o primeiro formado pelo segmento ABC, correspondente ao curso ascendente do pistão, e o segundo pelo segmento CDA, correspondente ao curso descendente.

O deslocamento mostrado na carta é relativo ao solo e não em relação à camisa. Caso a camisa não esteja ancorada, ou seja, não esteja presa ao revestimento do poço, a mesma se moverá durante o bombeio, e a carta terá a forma de um paralelogramo como mostrado na Figura 2-6. Se a camisa estiver devidamente ancorada, o formato será de um retângulo como na Figura 2-5. A inclinação similar dos segmentos AB e CD indicam se o SBM está ancorado ou não.

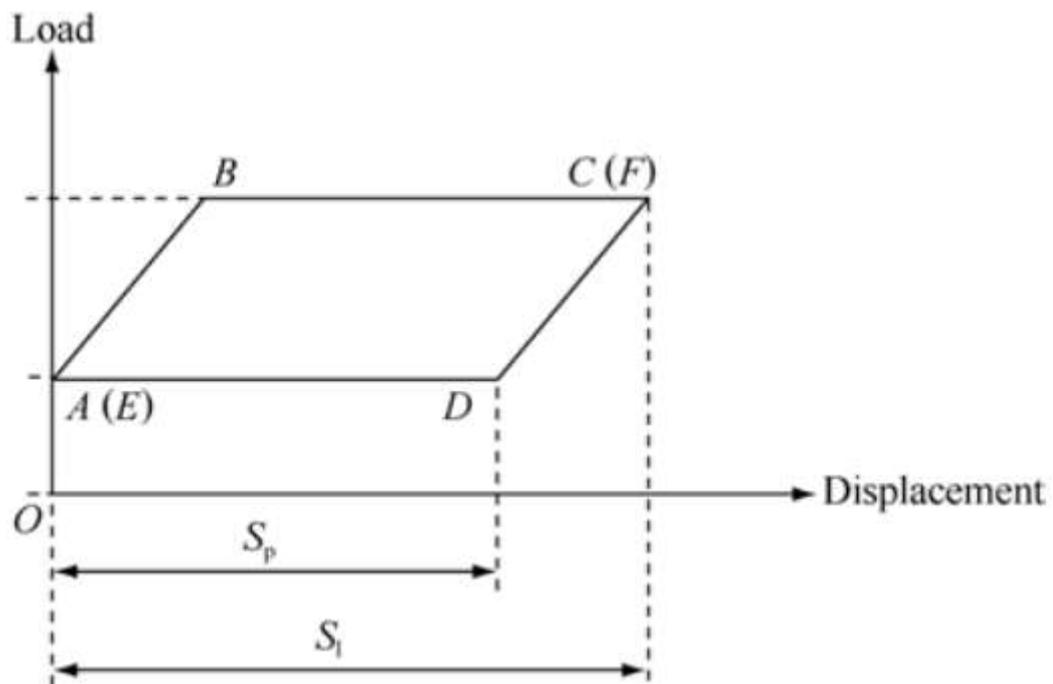


Figura 2-6: CDF exemplo de uma condição de bombeio com camisa não ancorada. Adaptado de HUA; XUNMING, 2011.

Takács descreve os eventos que explicam a forma da CDF ideal (TAKÁCS, 2003). Para simplificar a descrição é assumido o bombeio de um fluido incompressível. Abaixo temos a descrição por segmento conforme representado na Figura 2-6.

I. Curso ascendente:

1. Segmento AB: no início do movimento ascendente, a Válvula de Passeio é fechada devido à alta pressão hidrostática na tubulação acima. O fluido dentro da tubulação é elevado para a superfície pelo movimento do pistão. Ao mesmo tempo a pressão cai dentro da camisa, no espaço entre a Válvula de Passeio e a Válvula de Pé. Quando a pressão cair o suficiente dentro da camisa a Válvula de Pé se abrirá, evento demarcado no ponto B. O segmento apresenta uma linha reta numa condição de bombeio ideal, representando a subida em velocidade constante da carga.
2. Segmento BC: a abertura da Válvula de Pé, demarcada no início do segmento, permite a passagem do fluido proveniente do reservatório (anular) para o interior da camisa. O pistão e o volume de fluido dentro dele é deslocado pela força de tração da unidade de bombeio por um espaço  $S_p$ . A carga se mantém estável pelo deslocamento praticamente simultâneo e constante do pistão e do fluido para dentro da camisa. Durante o deslocamento ocorre produção de fluido na superfície ao mesmo tempo em que uma nova porção de fluido proveniente do poço invade o interior da camisa. Uma linha reta é a forma ideal desse segmento, mostrando estabilidade da carga no deslocamento.

II. Curso descendente:

1. Segmento CD: depois que o pistão chega ao fim do movimento ascendente a haste de bombeio começa o movimento descendente. Com o início do movimento descendente a Válvula de Pé se fecha devido ao aumento da pressão dentro da camisa (ponto C). Assim que a pressão dentro da camisa for bastante a Válvula de Passeio se abrirá (ponto D). A abertura da Válvula de Passeio da passagem ao fluido proveniente da camisa para o interior do pistão. Uma linha reta também é a forma ideal deste segmento, representando a queda em velocidade constante da carga.
2. Segmento DA: com a abertura da Válvula de Passeio, um volume de fluido proveniente da camisa invade o pistão enquanto o mesmo é no sentido descendente. O dinamômetro exibe valor estável de carga no segmento

apresentando uma linha reta. Ao final do segmento, com o cessar do movimento descendente e o início do movimento ascendente, a Válvula de Passeio se fecha o que é demarcado pelo ponto A.

Essencialmente a abertura e fechamento das válvulas do sistema, sendo simples válvulas de retenção, ocorrem devido à variação de pressão que pode ser inferida pela variação de carga no dinamômetro. Diversas anomalias na operação de bombeio podem alterar o comportamento das variações de pressão, e, portanto atrasar ou adiantar a abertura das válvulas em relação ao deslocamento do pistão. Em uma CDF de uma condição de bombeio anômala, os pontos de abertura e fechamento de válvulas podem ser identificados similarmente a como é feito em uma CDF de condição de bombeio ideal, determinando-se os segmentos de variação de carga no início de fim do deslocamento do pistão, o que, portanto indicam as variações de pressão, e os pontos de abertura e fechamento de válvulas podem ser identificados nos pontos de carga máxima e mínima deles.

### **2.3 As condições de bombeio representadas nas CDF**

Este trabalho se concentra em condições de bombeio reconhecíveis nas Cartas Dinamométricas de Fundo revisadas no trabalho de Bezerra (BEZERRA, 2010).

Uma análise básica do Sistemas de Bombeio Mecânico através da CDF pode tomar como base uma carta ideal. Toda vez que a área da curva fechada for inferior à área de uma carta ideal, poderá haver perda de produção proporcional a esta diferença. Em exemplos de CDF como o da Figura 2-7, um contorno mais fino é usado para indicar a CDF ideal, um retângulo, o que permite identificar a diferença de área para a CDF exemplificada.

Tradicionalmente o diagnóstico do bombeio através das Cartas Dinamométricas é um trabalho visual, realizado por especialistas que contam com o conhecimento do funcionamento do sistema, exemplos de cartas previamente analisadas e experiência própria, portanto é um trabalho sujeito à subjetividade de cada indivíduo.

As condições de bombeio englobam a condição de bombeio Normal, ou seja, sem anomalias, e as condições de bombeio com anomalias diversas. As condições de bombeio são tratadas aqui como classes, de forma a utilizar a terminologia comumente usada no campo de reconhecimento de padrões. As classes que serão descritas então representam cada uma ou a condição de bombeio Normal ou uma anomalia específica.

É importante considerar que CDFs de formas diferentes dos exemplos apresentados podem existir, sejam formas intermediárias entre os exemplos apresentados de uma classe de

condição de bombeio ou ainda formas que representem condições mais extremas de anomalias. Além disso, as CDFs também podem apresentar formas diferentes devido à presença de mais de uma anomalia no bombeio, pertencendo então a de uma classe de condição e bombeio, e suas formas podem ser muito diferentes das exemplificadas pelas CDFs de apenas uma classe.

Neste trabalho, além de apresentar exemplos de CDF de diversas classes de condição de bombeio conforme a literatura, uma análise compreensiva é realizada quanto às características comuns entre os exemplos, especialmente em relação ao comportamento da carga entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas (segmentos AB, BC, CD e DA), o que permite identificar características mais específicas de cada condição de bombeio.



Figura 2-7: CDF da classe Normal. Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.3.1 A classe Normal

Uma CDF classificada como Normal (Figura 2-7) em geral representa um poço operando com alta produtividade. A forma da CDF classificada como Normal em geral se aproxima do exemplo de uma CDF de condição de bombeio ideal. A condição de bombeio Normal é uma condição de bombeio cheio, onde a camisa fica preenchida e o pistão opera sem sair do fluido.

Na Figura 2-8 temos mais exemplos de CDF da classe Normal encontrados na literatura (EICKMEIER, 1967; KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991; SCHNITMAN; ALBUQUERQUE; CORRÊA, 2003; TAKÁCS, 2003), com a indicação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas. Podemos observar que alguma inclinação pode ocorrer nos segmentos AB e CD, mas sempre uma inclinação similar em ambos. Quando há inclinação nos segmentos, como na Figura 2-7 e na Figura 2-8-b, temos uma condição de bombeio dita Normal, apesar de ter a camisa não ancorada ou com ancoragem falha. A condição de bombeio com falta de ancoragem pode ser considerada uma subclasse das condições de bombeio, pois não desqualifica a operação como normal. Todas as outras classes de CDF que

serão apresentadas podem ter formas com e sem ancoragem, portanto, este é um dos muitos fatores que podem tornar as CDFs da mesma classe visualmente distintas. É importante registrar que outras condições de bombeio podem afetar a inclinação dos segmentos AB e CD, portanto outras características dos segmentos da CDF precisam ser observadas para garantir um diagnóstico eficiente.

Em todos os segmentos pode se observar alguma curvatura, em geral sutil, devido a fatores como as elasticidades envolvidas no sistema, como a das hastes de bombeio ou da compressibilidade do fluido em si. Assim o desenvolvimento da carga é apenas próximo de uma velocidade constante entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas.

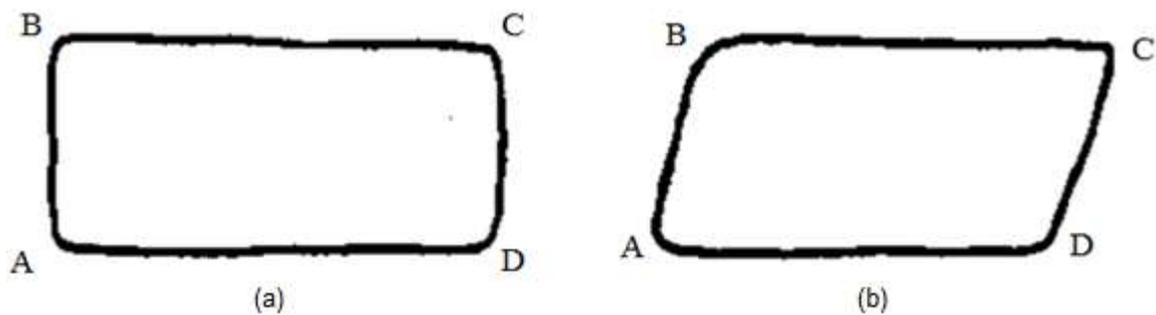


Figura 2-8: CDF da classe Normal com pontos de abertura e fechamento de válvulas demarcados: a – bomba cheia com coluna de tubos ancorada; b – bomba cheia com coluna não ancorada. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.

### 2.3.2 Ancoragem Deficiente

Para reduzir os efeitos da elasticidade da coluna de produção, é instalado um dispositivo para a ancoragem mecânica ao revestimento do poço. Um poço com coluna de produção não ancorada apresenta uma CDF com inclinação nos segmentos AB e CD como na Figura 2-8-b, e se não houver outra anomalia associada à condição de bombeio é em geral classificada como Normal.

Caso a funcionalidade do dispositivo de ancoragem seja deficiente, surge a distorção mostrada na Figura 2-9, onde os segmentos AB e CD apresentam dois subsegmentos maiores, um com praticamente 90 graus em relação ao eixo do deslocamento e outro com inclinação. É observada também uma ligeira queda na carga no segmento AB e uma subida na carga no segmento CD. Em comparação visual com formas de outras classes estudadas neste trabalho, a mera identificação de um subsegmento de queda de carga dentro do segmento AB e uma subida de carga no segmento CD é suficiente para reconhecer a ancoragem deficiente. A disposição desses subsegmentos dentro de seus segmentos de origem pode variar conforme observado na Figura 2-10.

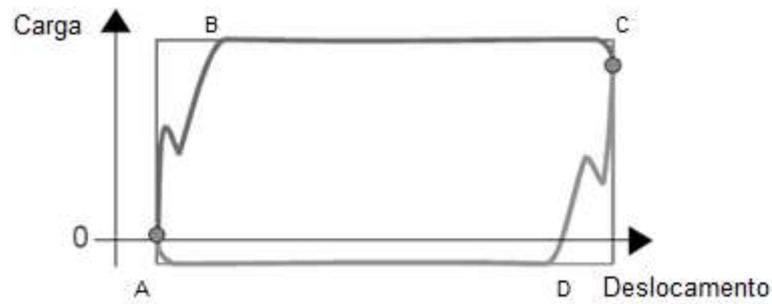


Figura 2-9: A classe de Ancoragem Deficiente. Adaptado de Bezerra, 2010.

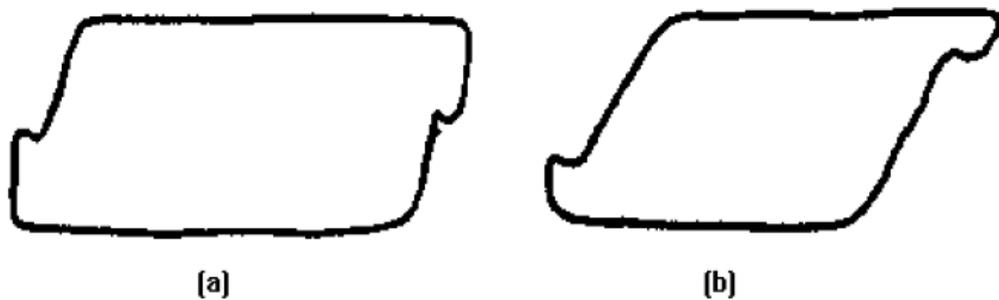


Figura 2-10: Exemplos de CDF da classe Ancoragem Deficiente. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.

### 2.3.3 Pancada de Fluido

O fenômeno da pancada de fluido (Figura 2-11) é observado no curso descendente, especificamente no segmento CD. O problema tem início no ciclo ascendente, quando a camisa não é plenamente cheia com o fluido proveniente do reservatório. No ciclo descendente o pistão inicia sua descida sem encontrar nenhuma resistência prática, até colidir com o fluido presente no interior da camisa, quando começa finalmente a transferência da carga da coluna de fluidos da Válvula de Passeio para a Válvula de Pé e a pressão dentro da camisa começa a aumentar causando a abertura da Válvula de Passeio e (TAKÁCS, 2003). Durante a descida do pistão fora do fluido, o mesmo tem baixa resistência abaixo dele, ficando praticamente pendurado nas hastes de bombeio e a carga referente principalmente ao pistão e coluna de fluidos acima dele é marcada no dinamômetro, como pode ser visto na Figura 2-11.

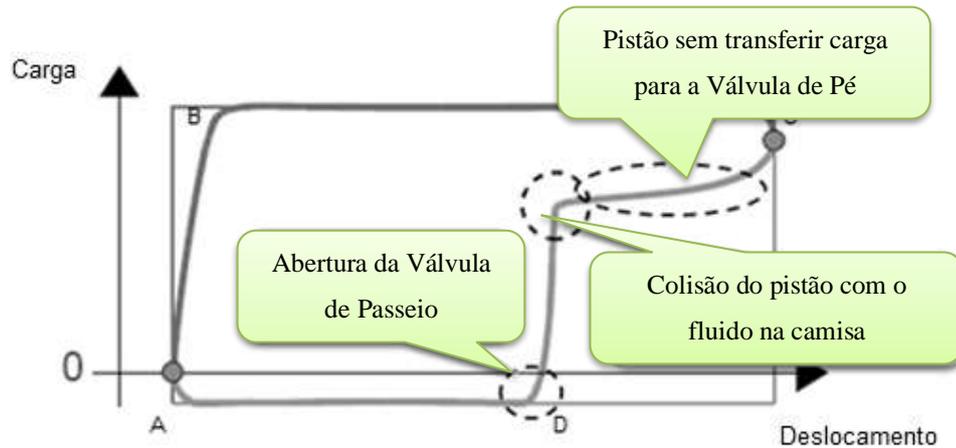


Figura 2-11: CDF da classe Pancada de Fluido e interpretação de eventos em seu contorno. Adaptado: Bezerra, 2010.

Como pode se ver na Figura 2-12 a pancada de fluido pode variar muito sua forma, especialmente quanto à área. A inclinação dos segmentos AB e CD identificada na classe Normal referente à ancoragem ou não da coluna de fluidos é similar na classe Pancada de Fluido, porém o segmento CD apresenta três subsegmentos ao invés de apresentar apenas uma linha praticamente reta. Nos subsegmentos onde a variação de carga é mais intensa que a variação de deslocamento (subsegmentos verticais) se tem a mesma inclinação referente à presença ou não da ancoragem.

O fenômeno da Pancada de Fluido costuma ser avaliado quanto a sua intensidade a depender do deslocamento do evento de colisão do pistão com o fluido, o que pode ser observado na CDF.

Os segmentos AB, BC e DA são os mesmos de uma carta Normal, se diferenciando apenas pelo comprimento do último, já que quanto maior a intensidade da Pancada de Fluido menor será o preenchimento da camisa, portanto menor será o segmento DA como na Figura 2-12-c e Figura 2-12-d. Com exceção da Pancada de Fluido suave vista na Figura 2-12-a, podemos identificar um segmento horizontal dentro do segmento CD que representa principalmente o pistão sem o suporte do fluido abaixo dele no movimento descendente. Em todos os exemplos encontramos dois subsegmentos verticais, no segmento CD, sendo que o maior ocorre devido à transferência de carga quando o pistão atinge fluido na camisa. Por estas observações podemos afirmar que a identificação de um subsegmento vertical dentro do segmento CD com curvatura similar ao segmento CD Normal e fora do deslocamento máximo indica então a pancada de fluido, e o deslocamento desse subsegmento a intensidade da anomalia.

A Pancada de Fluido não é uma condição de bombeio cheio, pois a camisa não fica completamente preenchida de fluido e o pistão fica fora total ou parcialmente do mesmo durante o ciclo de bombeio. Uma condição de bombeio fora do fluido, seja total ou parcialmente fora do fluido, costuma ser chamada de *Pump Off* ou *Pumped Off*, que pode ser traduzido para “bombeio fora” (GIBBS, 1963). A condição *Pumped Off* pode ser considerada uma subclasse das CDF.

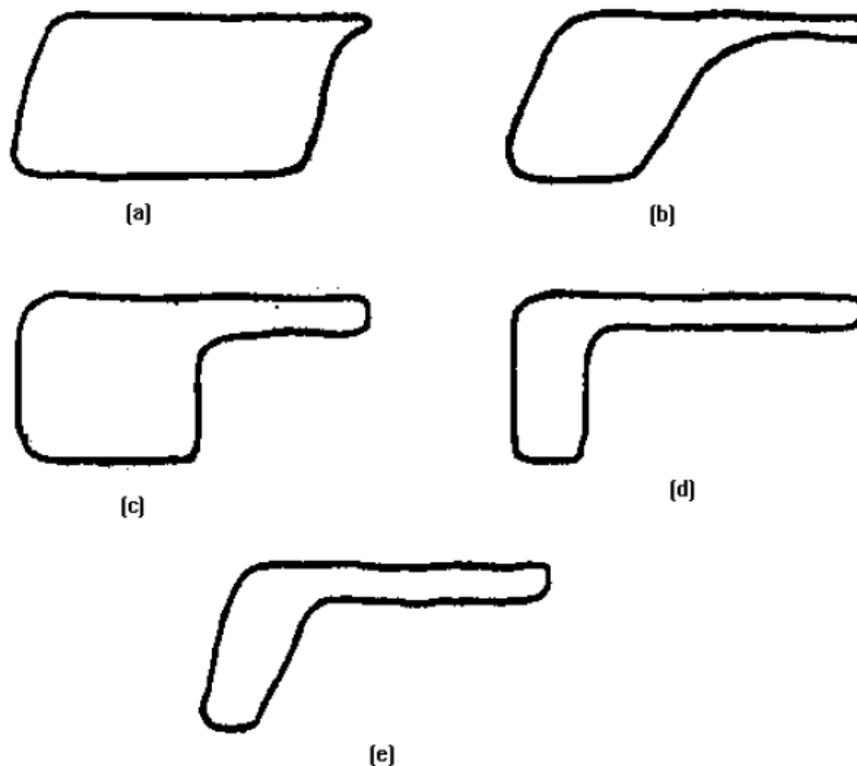


Figura 2-12: Exemplos de CDF da classe Pancada de Fluido: a – Pancada de Fluido suave com coluna não ancorada; b – Pancada de Fluido severa com coluna não ancorada; c – Pancada de Fluido severa com coluna ancorada; d – Pancada de Fluido muito severa com coluna ancorada; e – Pancada de Fluido muito severa com coluna não ancorada. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.

#### 2.3.4 Interferência de Gás

Nesta condição de bombeio ocorre problema similar à pancada de fluido, porém o espaço deixado na camisa é preenchido com gás pressurizado (Figura 2-13).

No início da descida do pistão não há transferência de carga imediata para o fluido na camisa, mas a presença do gás no interior da camisa absorve aos poucos a carga do mesmo enquanto é comprimido, retardando a queda da carga medida no dinamômetro conforme pode ser visto pela inclinação do segmento CD. O segmento AB demonstra a expansão de gás no início da ascendência, e este segmento que normalmente é muito retilíneo ganha alguma

curvatura. Poços com Razão Gás Óleo (RGO) elevada tendem a apresentar este tipo de problema.

Caso a produção de gás seja mais severa o segmento AB é ainda mais alterado como apresentado na Figura 2-14-a que representa uma CDF de baixa produção de óleo devido à interferência de gás.

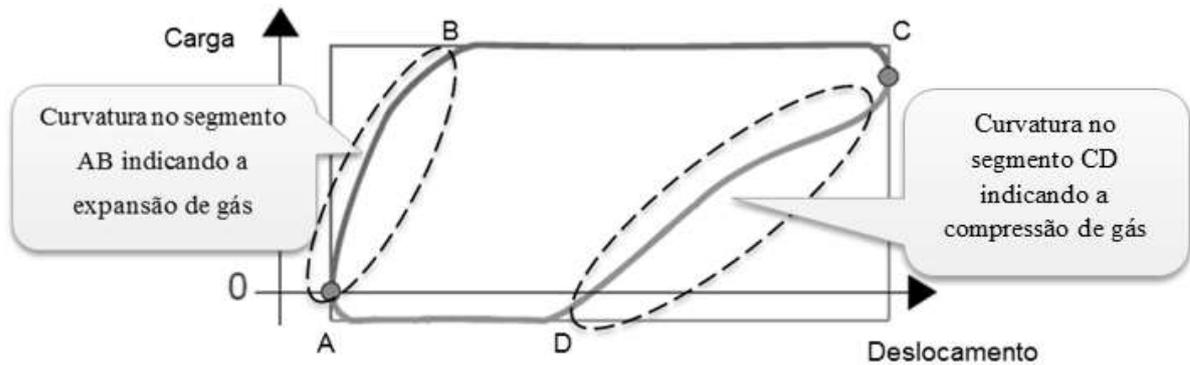


Figura 2-13: CDF da classe Interferência de Gás. Adaptado: Bezerra, 2010.

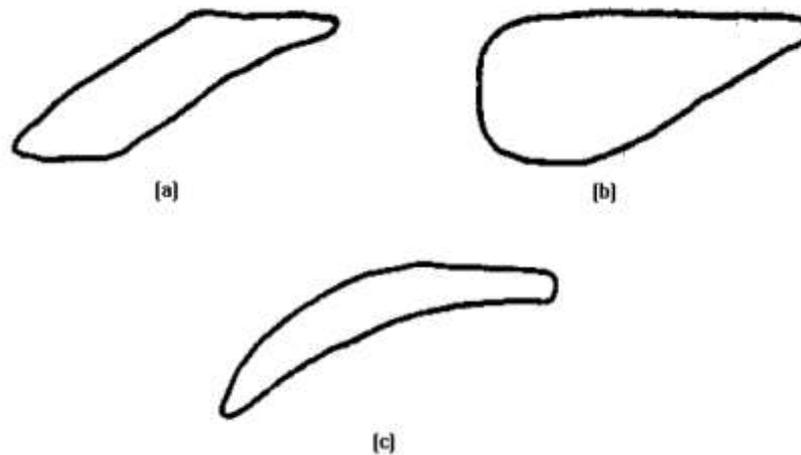


Figura 2-14: Exemplos da classe Interferência de Gás: a – interferência de gás severa; b – interferência de gás moderada; c – bloqueio de gás. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.

A Figura 2-14-c apresenta uma CDF onde a produção de gás é tão severa que praticamente não há produção de óleo na superfície, apenas gás, e a condição costuma ser chamada também de Bloqueio de Gás. Diferente de outros trabalhos no tema, neste consideramos o Bloqueio de Gás uma subclasse da Interferência de Gás, pois é uma consequência da evolução da anomalia, portanto podem existir formas intermediárias entre uma Interferência de Gás severa e um Bloqueio de Gás. São os mesmos segmentos afetados,

os segmentos AB e CD, que no Bloqueio de Gás ficam muito mais curvados e inclinados, além de praticamente não haver um segmento DA.

### 2.3.5 Vazamento na Válvula de Pé

Com o passar do tempo a Válvula de Pé pode perder a sua estanqueidade, dando passagem ao fluido do interior da camisa de volta para o reservatório (anular) no curso descendente (Figura 2-15).

Este efeito é acentuado no início e fim do curso, onde a velocidade do pistão é menor. A taxa de vazamento na Válvula de Pé fica equiparada à taxa de deslocamento do pistão no início do movimento descendente, mantendo baixa a pressão que o fluido na camisa exerce contra a Válvula de Passeio, portanto retardando a abertura da mesma, que só ocorre em um ponto com deslocamento mais baixo (ponto D). Após a abertura da Válvula de Passeio, a carga fica praticamente estabilizada como aparece no segmento DA. Com a redução da velocidade do pistão no fim do curso a taxa de vazamento se equipara novamente à taxa de deslocamento do pistão, reduzindo a pressão abaixo da Válvula de Passeio e a mesma se fecha antes do fim do curso descendente (ponto A).

Os segmentos AB e CD podem apresentar uma reta ou ter alguma curvatura quando o vazamento é mais severo (Figura 2-16-a). A inclinação dos segmentos também fica mais acentuada conforme a severidade do vazamento aumenta.

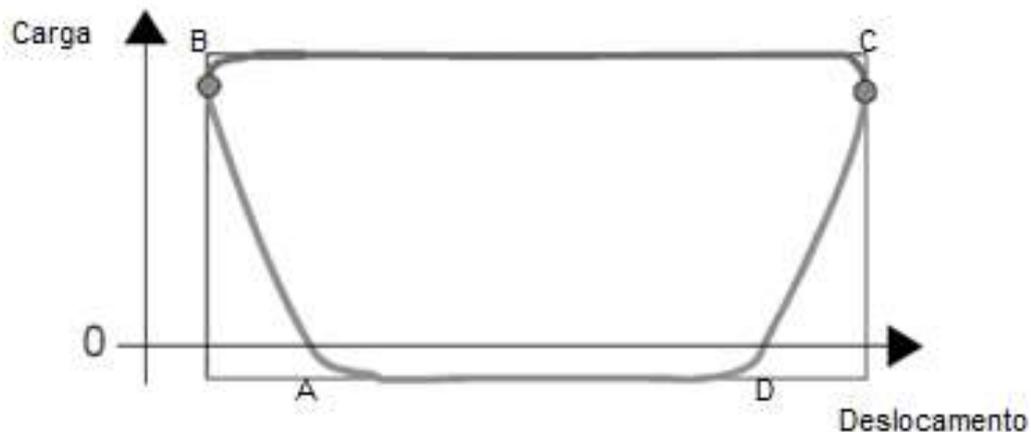


Figura 2-15: CDF com a classe Vazamento na Válvula de Pé. Adaptado: Bezerra, 2010.

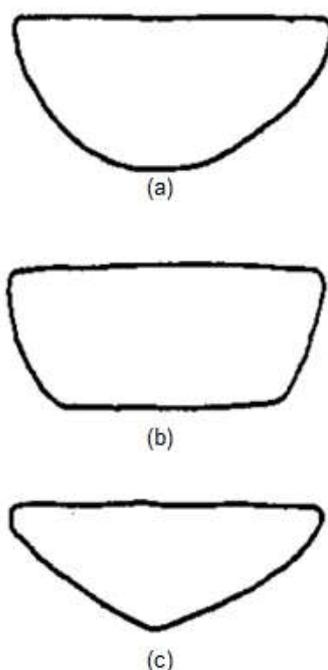


Figura 2-16: Exemplos de CDF da classe Vazamento na Válvula de Pé: a – vazamento severo na Válvula de Pé; b – vazamento moderado na Válvula de Pé; c – vazamento severo na Válvula de Pé. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.

### 2.3.6 Vazamento na Válvula de Passeio

Similarmente à classe Vazamento na Válvula de Pé, com o desgaste a Válvula de Passeio pode perder a sua estanqueidade, dando passagem ao fluido do interior pistão de volta para a camisa no curso ascendente (Figura 2-17).

Nessa condição de bombeio, a taxa de Vazamento na Válvula de Passeio fica equiparada à taxa de deslocamento do pistão no início do movimento ascendente, retardando a mudança de pressão na camisa o que retarda a abertura da Válvula de Pé (ponto B). Com a abertura da Válvula de Pé a carga estabiliza como pode ser visto no segmento BC. A redução da velocidade do pistão no fim do curso faz a taxa de vazamento se equipar novamente à taxa de deslocamento do pistão aumentando a pressão dentro da camisa o que fecha a Válvula de Pé antes do fim do curso (ponto C).

De forma similar a classe Vazamento na Válvula de Pé, os segmentos AB e CD apresentam inclinação proporcional à intensidade do vazamento na Válvula de Passeio. Os segmentos podem ser mais retilíneos ou mais curvos, especialmente quando o vazamento é mais severo (Figura 2-18-a).

No caso da coluna de tubos não ter ancoragem, o segmento AB vai apresentar uma inclinação diferente do segmento CD (Figura 2-18-b).

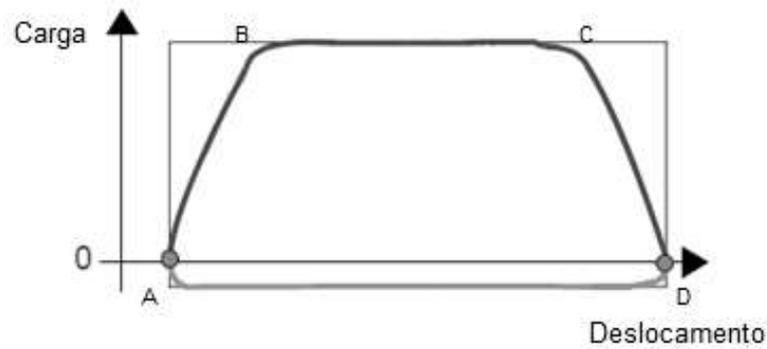


Figura 2-17: CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio. Adaptado: Bezerra, 2010.

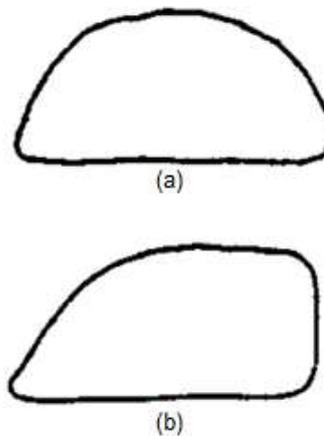


Figura 2-18: Exemplos de CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio: a – vazamento severo na Válvula de Passeio; b – Vazamento na Válvula de Passeio e coluna de tubos não ancorada. Adaptado de KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991.

### 2.3.7 Batida na parte superior da Bomba

Caracterizado pelo choque do pistão contra o topo da bomba no fim do curso ascendente. No final do segmento BC é observado um ligeiro aumento na carga (Figura 2-19), portanto um subsegmento vertical num segmento normalmente horizontal, indicando a ocorrência do problema.

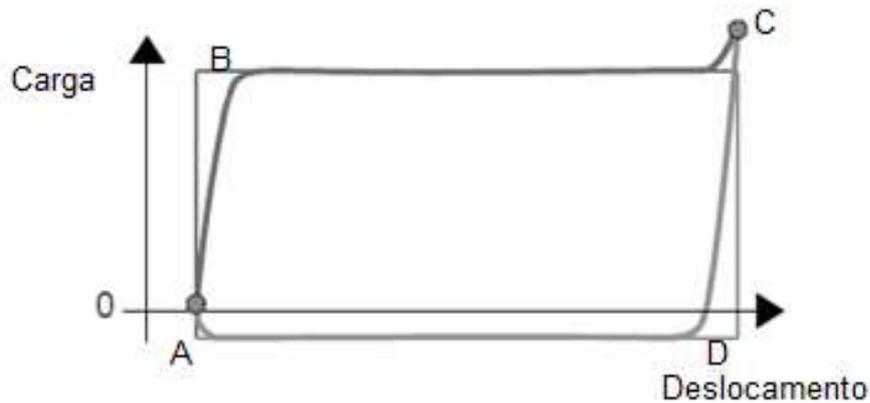


Figura 2-19: CDF da classe Batida na Parte Superior da Bomba. Adaptado: Bezerra, 2010.

### 2.3.8 Batida na Parte Inferior da Bomba

Neste caso (Figura 2-20), o pistão se choca contra a Válvula de Pé no final do curso descendente, segmento DA, onde se observa uma súbita queda da carga, portanto um subsegmento vertical em um segmento normalmente horizontal, indicando a ocorrência da anomalia.

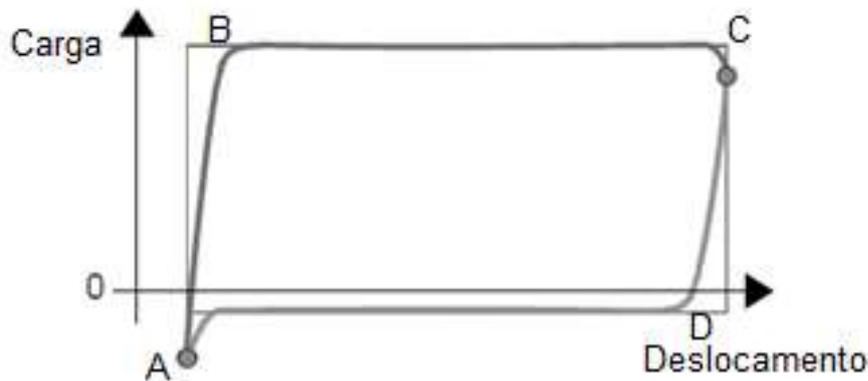


Figura 2-20: CDF da classe Batida na Parte Inferior da Bomba. Adaptado: Bezerra, 2010.

### 2.3.9 Camisa Abaulada

Uma condição de bombeio com camisa abaulada afeta o desenvolvimento da carga e se reflete na Carta Dinamométrica tanto no curso ascendente quanto no descendente (Figura 2-21). Na ascendência do pistão, devido ao aumento do atrito causado pelo abaulamento de alguma região da camisa, o segmento BC apresenta um subsegmento de aumento da carga, uma convexidade. Similarmente, no segmento DA, que normalmente é uma linha reta devido à estabilidade da carga, um subsegmento de convexidade é identificado, devido à redução da carga causada pelo aumento do atrito do pistão contra a camisa na descida, o que faz com que

parte da carga que é suportada pelo fluido e pela HB seja também suportada ainda mais pela camisa.

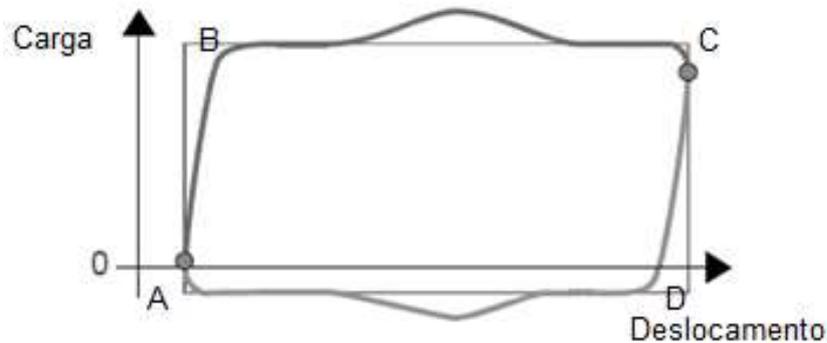


Figura 2-21: CDF da classe Camisa Abaulada. Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.3.10 Camisa Desgastada ou Furada

A camisa desgastada ou furada se apresenta na Carta Dinamométrica apenas no curso ascendente (Figura 2-22).

Com o desgaste ou furo de alguma região da camisa ocorre vazamento de fluido do pistão de volta para camisa, o que aumenta a pressão momentaneamente entre o pistão e a Válvula de Pé e diminui a carga puxada no movimento ascendente, segmento BC. Assim um subsegmento de redução da carga é identificado na Carta Dinamométrica com imediato aumento da carga para o valor normal do segmento. Essa redução momentânea de carga na Carta Dinamométrica pode ser observada como uma concavidade na forma.

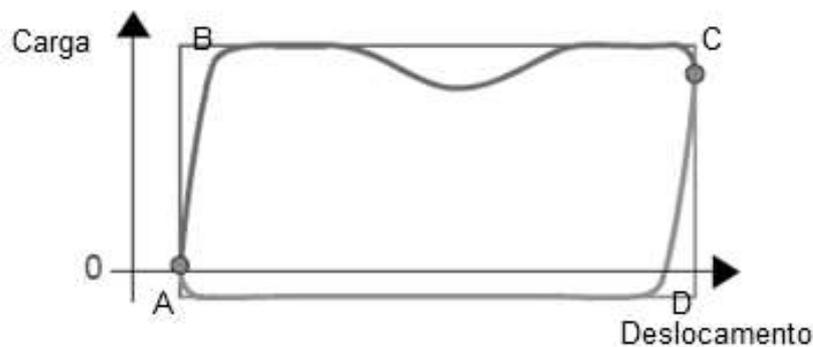


Figura 2-22: CDF da classe Camisa Desgastada. Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.3.11 Poço Surgente

Nessa condição de bombeio o reservatório apresenta surgência natural do petróleo, ou seja, o petróleo sobe a superfície espontaneamente. A surgência do petróleo faz com que o SBM opere fazendo mínimo esforço, o que pode ser observado na comparação da CDF ideal,

em linha fina, com a CDF da classe Poço Surgente em linha mais grossa na Figura 2-23. A CDF de Poço Surgente quase não apresenta valor de Carga positiva, pois o petróleo acaba empurrando o pistão para cima, apresenta valores muito negativos de Carga que a CDF ideal. A CDF apresenta uma inclinação para baixo e uma leve curvatura no segmento BC, com alguma concavidade.

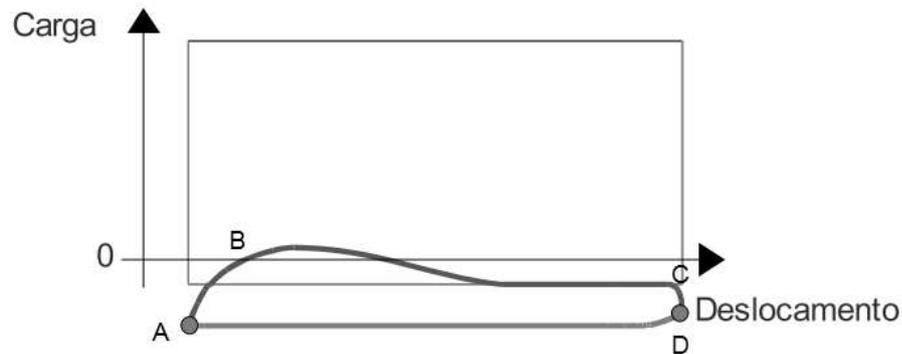


Figura 2-23: Exemplo da classe Poço Surgente. Adaptado de Bezerra, 2010.

### 2.3.12 Pistão Preso

Com o pistão preso, a variação de deslocamento na CDF é praticamente nula como pode ser observado na Figura 2-24. Nessa condição não há abertura e fechamento de válvulas.

A forma da CDF é achatada na vertical, indicando a variação da carga medida no dinamômetro e a praticamente nula variação do deslocamento. A variação de carga sem a variação no deslocamento indica apenas que o cabresto, acima da haste de bombeio, está sendo tensionado e solto devido ao movimento cíclico do sistema. Nesta classe não faz sentido a identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas.

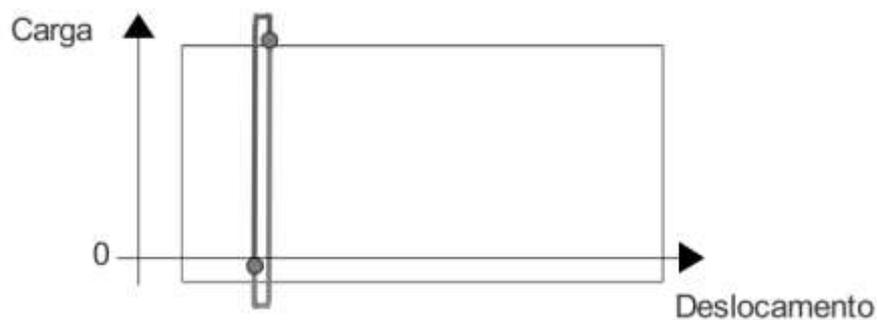


Figura 2-24: CDF da classe Pistão Preso: Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.3.13 Válvula de Pé Emperrada Aberta

Uma Válvula de Pé emperrada aberta mantém quase constante a carga medida no dinamômetro, por volta do máximo de carga (Figura 2-25), tanto no curso ascendente quanto

no curso descendente, produzindo uma forma achatada na horizontal. A Válvula de Pé emperrada está constantemente aberta e o fluido não permanece na camisa no curso descendente, portanto a carga do pistão não tem para onde ser transferida.

Nessa condição de bombeio não há abertura de válvulas de passeio e pé, já que a Válvula de Pé está aberta continuamente e a Válvula de Passeio não abre devido ao pistão pressionar o fluido na camisa. A forma da figura indica também a falta de abertura e fechamento das válvulas com a variação mínima nos valores de carga.

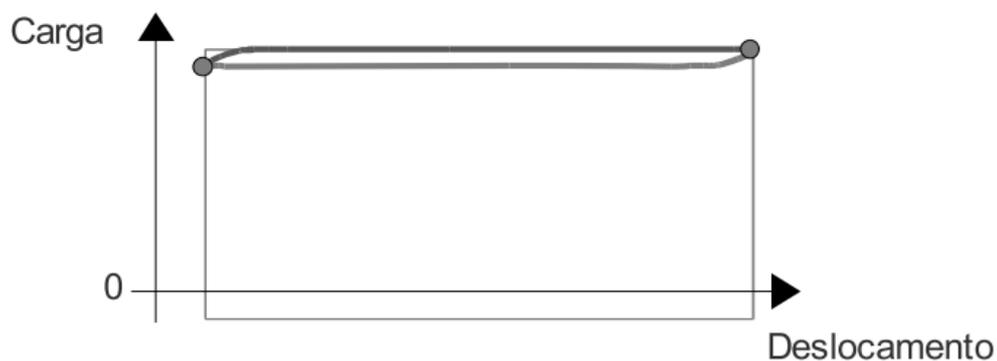


Figura 2-25: CDF da classe Válvula de Pé Emperrada. Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.3.14 Fricção

A fricção no sistema de bombeio pode ter origem no fluido ou nas partes internas da bomba, e causa um desenvolvimento menos retilíneo da carga dentro dos segmentos da CDF, dando um aspecto convexo a mesma (Figura 2-26). Podemos observar que todos os segmentos, AB, BC, CD e DA apresentam uma curvatura similar, uma forma convexa.

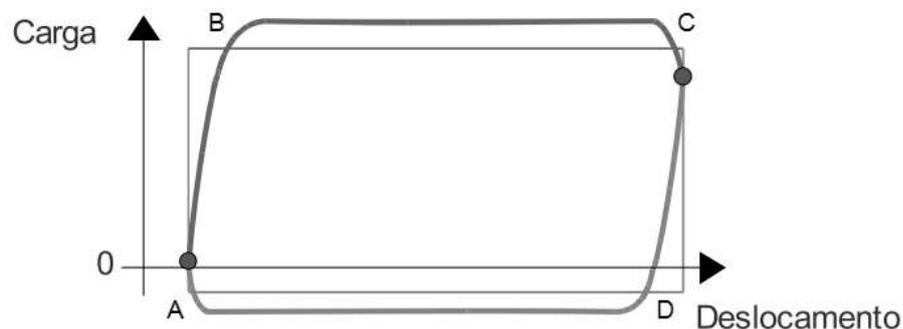


Figura 2-26: CDF da classe Fricção. Adaptado de Bezerra, 2010.

### 2.3.15 Bomba Gasta

Quando a bomba está gasta, não existe produção de fluido. Tanto no curso ascendente quanto descendente a carga medida é próxima de zero (Figura 2-27). A CDF tem

uma forma achatada na horizontal, indicando a mínima variação de carga e uma variação de deslocamento aparentemente normal. Sem a variação de carga não faz sentido a identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas.

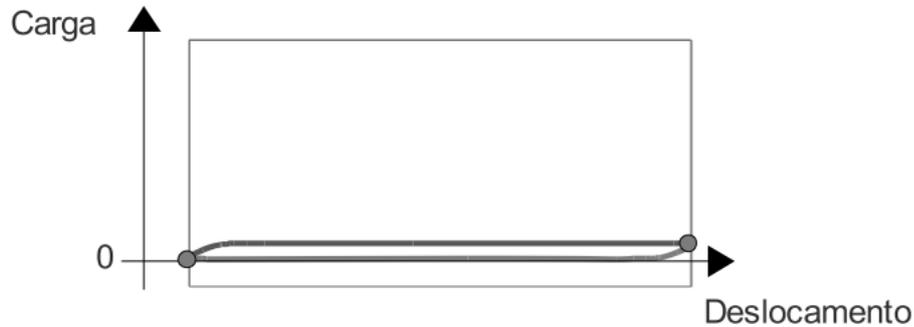


Figura 2-27: CDF da classe Bomba Gasta. Fonte: Bezerra, 2010.

### 2.3.16 Haste Partida

Uma coluna de hastes partida não exercerá qualquer influência sobre o pistão, que ficará inerte no fundo, sem qualquer deslocamento ou variação de carga sobre ele, conforme a indicação da CDF real na Figura 2-28. No entanto, como as CDFs obtidas são calculadas a partir de CDS com suposição de coluna de hastes integra, a CDF calculada apresenta uma forma que sugere deslocamento do pistão, como a indicação de CDF calculada na Figura 2-28.

A forma da CDF da classe Haste Partida é similar então a da classe Bomba Gasta, com a diferença importante de que os valores de carga na Haste Partida são negativos. Similarmente a outras classes, sem a variação de carga não faz sentido a identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas.

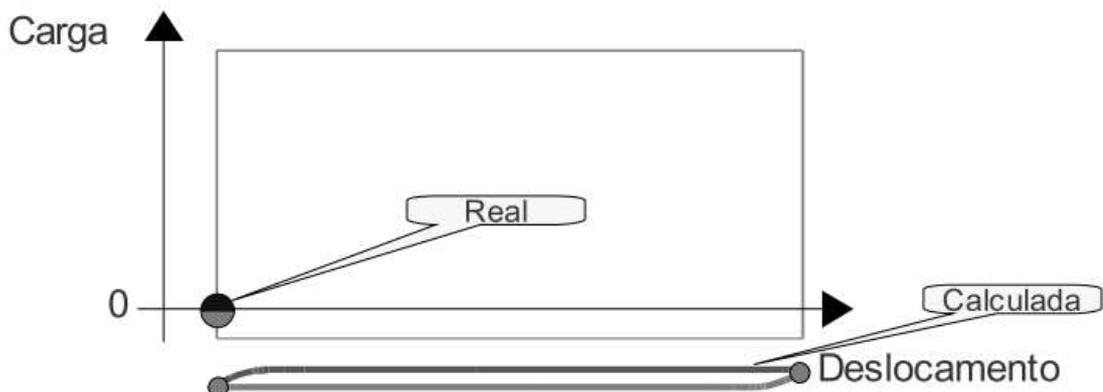


Figura 2-28: CDF da classe Haste Partida. Fonte: Bezerra, 2010.

## 2.4 Estado da arte do diagnóstico automático do SBM por Cartas Dinamométricas

O estudo das Cartas Dinamométricas começou em 1936 com Gilbert (GILBERT, 1936), e foi expandido em 1966 com Gibbs e Neely quanto ao uso das Cartas Dinamométricas para análise do sistema de bombeio de fundo (GIBBS; NEELY, 1966).

Muitos trabalhos foram desenvolvidos na área e entre eles destaca-se o trabalho de Abello ET AL, em 1993, que apresenta um método para classificar as Cartas Dinamométricas baseado na extração de características geométricas (ABELLO; HOUANG; RUSSELL, 1993), tanto da carta como um todo quanto isoladamente dos segmentos ascendente e descendente da Carta Dinamométrica. A abordagem utiliza então uma equiparação com uma biblioteca de características de cartas classificadas por especialistas humanos para a classificação. O método mostrou resultados promissores, mas é muito dependente da biblioteca de cartas, que deve ser grande o bastante para classificar as diferentes formas que as cartas podem assumir, e esse tamanho é indeterminado.

Em 2003 foi proposto um método baseado em pontos de interesse (SCHNITMAN; ALBUQUERQUE; CORRÊA, 2003). O método utiliza técnicas geométricas para determinar pontos de maior curvatura na forma da Carta e os processa através de um sistema baseado em inteligência artificial que referencia padrões para as classes de condições de bombeio. Os padrões definem áreas onde os pontos de interesse podem aparecer ou não a depender da condição de bombeio. O método foi testado em um universo de 5 condições de bombeio diferentes.

Um sistema de reconhecimento de padrões de Cartas Dinamométricas usando redes neurais artificiais SOM (*self organizing maps*) foi apresentado em 2007 (XU; XU; YIN, 2007). O trabalho apresentou promissores resultados usando apenas os valores de carga das cartas como entrada para rede, mas foi testado com apenas 5 condições de bombeio.

Em 2009 descritores de Fourier (análise de frequência) e correlação de Pearson (estatística) foram usados por Lima ET AL (DE LIMA; GUEDES; SILVA, 2009). A correlação estatística foi usada para comparar os descritores extraídos de Cartas Dinamométricas de 5 condições de bombeio, mas os resultados apesar de promissores indicam que apenas a aplicação de análise de frequência não é suficiente como extrator de características.

Em 2010 (BEZERRA, 2010) foi apresentado um trabalho que usou redes neurais artificiais para reconhecimento de padrões das Cartas Dinamométricas com resultados para 17

classes de condições de bombeio. A rede neural foi treinada com CDFs artificialmente geradas com ruído aleatório para maximizar a capacidade de generalização, e testada com CDFs reais. Neste trabalho foi utilizada interpolação de pontos dos valores de carga para gerar a entrada de características reduzidas para a rede, dividindo os segmentos ascendente e descendente da CDF em  $I$  intervalos como na Figura 2-29. Sabendo-se que é difícil adquirir uma base de dados de amostras de Cartas Dinamométricas reais das diversas condições de bombeio e suas variedades, e que sejam também pré-classificadas por especialistas, o trabalho mostrou um bom caminho para se lidar com essa falta de amostras e avaliar a capacidade de generalização de um sistema classificador.

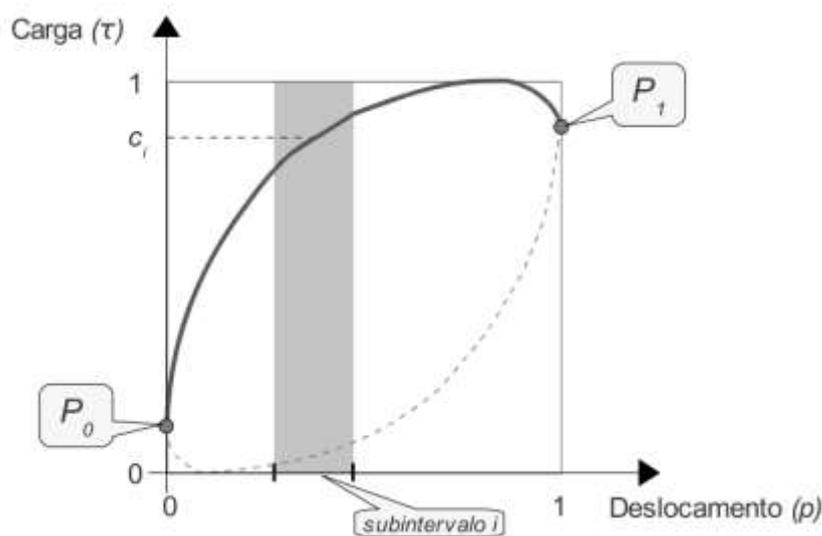


Figura 2-29: Extrator de características de Bezerra, que divide os segmentos ascendente e descendente da CDF em  $I$  intervalos, e interpola os pontos dentro deles para gerar as características  $c_i$  que serão usadas na rede neural artificial. Fonte: Bezerra, 2010.

Em 2011 técnicas de análise de curvatura foram usadas para identificar nas Cartas Dinamométricas a localização aproximada dos pontos de abertura e fechamento das válvulas do Sistema de Bombeio Mecânico (HUA; XUNMING, 2011), e testes de classificação usando estes pontos mostraram promissores resultados. Na abordagem a Carta Dinamométrica é segmentada em quatro regiões onde se supõe que os pontos de abertura e fechamento de válvulas estarão como na Figura 2-30, e então uma análise de curvatura é aplicada para identificar o ponto de maior curvatura dentro dos segmentos. No trabalho, a depender da forma da Carta Dinamométrica é necessário usar estratégias de segmentação mais intrincadas e complexas, como nas cartas de Pancada de Fluido, mas não fica clara a eficiência dessas estratégias para diversas classes de Carta Dinamométricas.

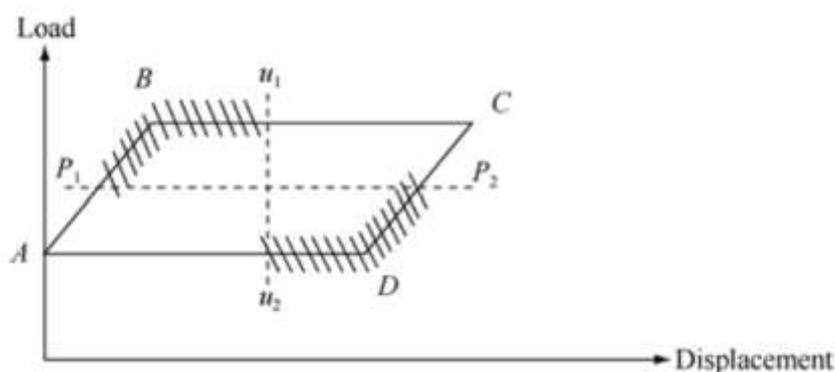


Figura 2-30: Exemplo da segmentação das Cartas Dinamométricas realizada no trabalho de Hua e Xumming, para a identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas. Fonte: Hua e Xumming, 2011.

Em 2012 Lima ET AL apresentaram um estudo de descritores de forma nas Cartas Dinamométricas comparando os resultados de classificação de 5 condições de bombeio usando descritores de forma diferentes e classificadores baseados na distância euclidiana e na correlação Pearson (LIMA; GUEDES; SILVA, 2012). O trabalho mostrou que combinações de classificadores com descritores diferentes são eficientes para algumas classes de CDF e para outras não. Os resultados de classificação gerais foram muitos promissores e podemos afirmar a partir desse trabalho que as características que definem cada classe de condição de bombeio podem ser muito diferentes, e algumas podem não ser separáveis linearmente.

Em 2013, um trabalho usou quatro subsegmentos das Cartas Dinamométricas para classificar 4 condições de bombeio (REGES; SCHNITMAN; REIS, 2013). O subsegmentos foram extraídos com base no comportamento da carga dentro do ciclo de bombeio, dividindo o mesmo em subida da carga, estabilidade da carga na ascendência, queda da carga e estabilidade da carga na descendência. Os segmentos extraídos ficam entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas. Os resultados se mostraram promissores indicando a viabilidade de análise da CDF através de segmentos entre os pontos estimados de abertura e fechamento de válvulas.

Ainda em 2013 (LI et al., 2013) o método PSO-SVM foi usado para classificar amostras de Cartas Dinamométricas de 10 condições de bombeio. As Cartas Dinamométricas foram particionadas em quatro segmentos e momentos estatísticos das curvas foram extraídos como características. Uma estratégia de validação cruzada chamada K-fold foi usada nesse trabalho o que aumenta a confiança nos resultados. O trabalho mostrou resultados muito promissores, mas apenas usando 128 amostras de Cartas Dinamométricas distribuídas em 10 condições de bombeio para treinar e testar. O método de segmentação usado neste trabalho apenas dividiu as cartas em 4 segmentos, cada um representando uma região de um dos

pontos de abertura e fechamento de válvulas. Os resultados são promissores e sugerem que uma segmentação criteriosa pode ser ainda mais eficaz.

Em geral, verifica-se que mesmo os trabalhos mais recentes se concentram apenas em pequenos conjuntos de classes de CDF, seja por dificuldades de aquisição de amostras ou fragilidade da metodologia. Os trabalhos em geral também não tratam de anomalias concomitantes representadas nas Cartas. Anomalias concomitantes apresentam formas de Cartas distintas, combinando características das classes de CDF envolvidas.

Devido a grande variedade de formas que as Cartas podem assumir representando as mesmas classes de condições de bombeio e suas combinações, é possível considerar que as mesmas técnicas podem gerar resultados muito diferentes se forem utilizadas bibliotecas com amostras de cartas diferentes. Técnicas modernas de análise de classificadores precisam ser aplicadas para uma avaliação mais robusta, porém geralmente os trabalhos não as utilizam.

Também é muito comum que na mesma biblioteca de amostras existam diversas Cartas que são muito similares devido à geração contínua das Cartas Dinamométricas. Caso o poço tenha uma condição de bombeio com boa produção, considerado Normal ou não, em geral não terá seu funcionamento interrompido, gerando cartas similares por longos períodos. Essas diversas Cartas Dinamométricas similares podem fazer com que os resultados de classificação acumulem muitos resultados positivos para as classes mais comuns, a exemplo de CDFs da classe Normal e da classe Pancada de Fluido, indicando um grau de exatidão muito alto para o classificador sem refletir sua capacidade de lidar com classes menos comuns. Nos trabalhos da área não é apresentada uma forma de avaliação da complexidade de classificação da biblioteca de Cartas que está sendo utilizada, e dessa forma não há garantia que seus resultados se repitam de forma consistente se forem aplicadas a uma biblioteca de Cartas diferente. Por exemplo, uma avaliação de distância euclidiana entre todos os pares de amostras de uma biblioteca de Cartas Dinamométricas poderia ser usada para indicar o quão diferentes podem ser amostras da mesma condição de bombeio e o quão similares podem ser amostras de condição de bombeio distintas. Devido às considerações apresentadas é especialmente complexo comparar os resultados apresentados nos trabalhos desse campo de estudo.

Podemos afirmar que entre os vários métodos apresentados o uso de segmentação das Cartas Dinamométricas baseada na localização dos pontos de abertura e fechamento de válvulas demonstra grande potencial. Os pontos de abertura e fechamento de válvulas nas Cartas Dinamométricas oferecem muita informação sobre as condições de operação do

Sistema de Bombeio Mecânico (HUA; XUNMING, 2011), e assim sendo, um método computacional para identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas é de particular importância e a única solução até o momento apresentada não tem confirmação de aplicabilidade em diversas classes de condição de bombeio (HUA; XUNMING, 2011).

Revisando os trabalhos na área é possível afirmar que há muitas abordagens analíticas para o problema, e trabalhos com métodos avançados são continuamente publicados a cada ano. Portanto, apesar do reconhecimento de padrões de Cartas Dinamométricas não ser um tema recente, ainda não há solução computacional padrão para a análise automática do Sistema de Bombeio Mecânico usando Cartas Dinamométricas, e as abordagens atuais ou são limitadas a um conjunto reduzido de classes de condição de bombeio, ou tem resultados que podem ser melhorados.

### 3 Reconhecimento de padrões aplicado a contornos de formas

#### 3.1 Reconhecimento de Padrões

Reconhecimento de padrões é uma disciplina científica que faz parte do campo da Inteligência Artificial. Há alguma discussão sobre sua definição e objetivo formalmente, podendo ser entendida como atividade concentrada na classificação de objetos em uma quantidade de classes ou categorias, atividade também chamada simplesmente de classificação. (THEODORIDIS; KOUTROUMBAS, 2009).

Numa visão mais ampla, o Reconhecimento de Padrões pode ser considerado sinônimo do campo Aprendizagem de Máquina, englobando a descoberta automática de regularidades em dados através do uso de algoritmos computacionais (BISHOP, 2006) e o uso dessas regularidades em atividades como a classificação (Figura 3-1), *clustering* (Figura 3-2), predição ou maximização.

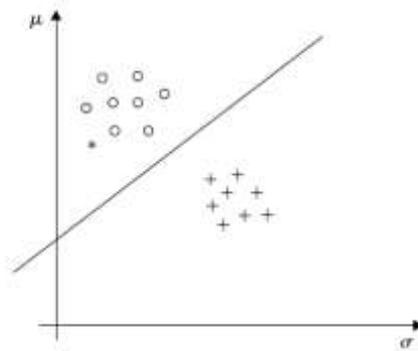


Figura 3-1: Exemplo de classificação de duas classes predefinidas, a classe A (círculo) e a classe B (cruz). Fonte: Theodoridis e Koutroumbas, 2009

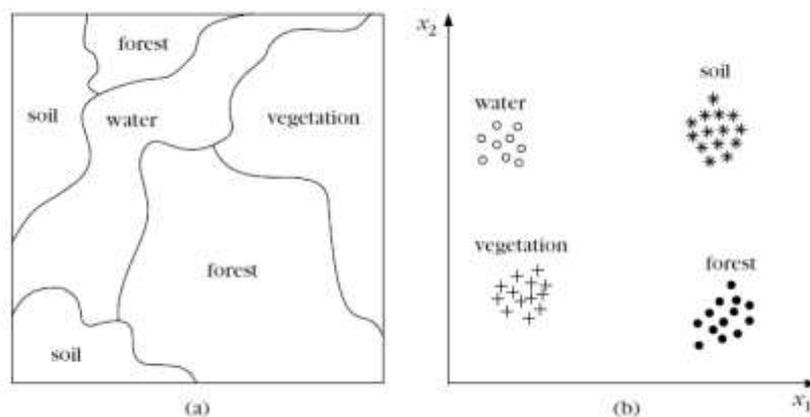


Figura 3-2: Exemplo de *clustering* aplicado a uma figura com diversos tipos de solo a esquerda e o resultado à direita. No clustering as classes de agrupamento não são predefinidas e o sistema cria os grupos por semelhança entre as características por ele processadas. Fonte: Theodoridis e Koutroumbas, 2009

Reconhecimento de Padrões envolve várias atividades humanas de grande importância prática, como predição de falência de instituições bancárias, reconhecimento de imagem e de fala, detecção de falhas de máquinas e diagnósticos de câncer (ISHIBUCHI; NOJIMA; KUWAJIMA, 2008).

Genericamente os objetos que são tratados nesses problemas variados são chamados de padrões.

### 3.2 Pré-processamento

Um estágio comum às aplicações práticas de reconhecimento de padrões é o pré-processamento, onde os dados de entrada originais de um problema são transformados para outro domínio onde se espera que o problema seja mais fácil de solucionar (BISHOP, 2006). O desenvolvimento de um sistema de classificação pode ser simplesmente dividido nos estágios de pré-processamento das informações dos objetos, projeto de classificador, e avaliação do sistema. O estágio de pré-processamento ainda pode ser subdividido em alguns estágios como o do sensor, a geração de características e a seleção de características (Figura 3-3).

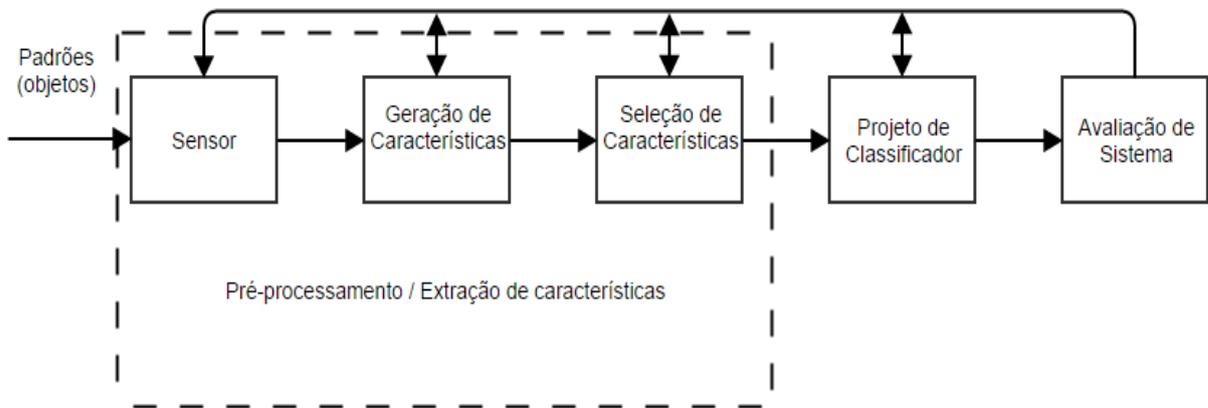


Figura 3-3: Os estágios básicos de desenvolvimento de um sistema de classificação. Adaptado de THEODORIDIS; KOUTROUMBAS, 2009

No pré-processamento, por exemplo, no problema de reconhecimento de faces, pode se extrair informações de relação entre os pixels de uma determinada imagem e usar estas informações para determinar se um conjunto é uma face.

O pré-processamento também pode ser usado com o objetivo de acelerar a computação, reduzindo o volume de dados para o mínimo necessário na solução do problema, evitando inclusive o processamento de redundâncias. Como exemplo, ainda sobre reconhecimento de faces, vídeos ao vivo podem gerar um grande volume de dados por

segundo, e um tratamento capaz de reduzir a dimensão das imagens (Figura 3-4) reduz também a complexidade e o tempo computacional necessário na resolução do problema.

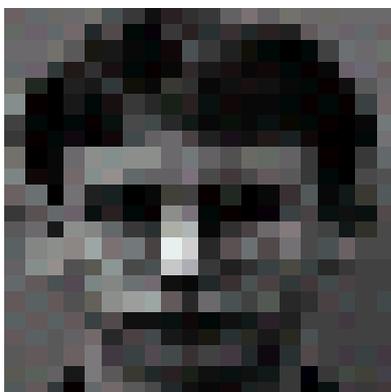


Figura 3-4: Imagem de uma face com dimensões reduzidas para redução de complexidade. Fonte: (CHITALIYA; TRIVEDI, 2010)

É importante registrar que o estágio de pré-processamento, conforme for definido, é aplicado não só aos dados originais utilizados para criação do sistema de reconhecimento de padrões como também para novos dados futuros que venham a ser usados.

### 3.3 Análise de Forma

A extração de características significativas de imagens é conhecida como análise de imagens. A discriminação de objetos baseados na aparência é uma tarefa de grande importância na análise de imagens (CHAUDHURI, 2013).

A forma é uma das características visualmente importantes e é uma das mais básicas para descrever o conteúdo de imagens (ZHANG; LU, 2004).

O termo forma pode ser confundido com a definição de um simples contorno externo, mas é importante considerar que algumas imagens são vazadas e que formas de três dimensões são representadas em duas dimensões em imagens, portanto as informações contidas dentro do contorno também fazem parte da forma e são úteis também para seu reconhecimento.

Comumente o termo “análise de formas” é utilizado na área de reconhecimento de padrões para definir a análise automática de formas em imagens para, por exemplo, detectar formas similares em uma base de dados. O termo “análise de formas” também é usado de forma mais ampla ao definir a análise de formas geométricas.

A análise de formas é descrita por usar métodos de representação de forma e descrição de forma (CHAUDHURI, 2013; LONCARIC, 1998; ZHANG; LU, 2004). No

entanto, não parece haver consenso no uso das duas terminologias nas publicações, e comumente os métodos são definidos simplesmente como de descrição de forma, portanto este trabalho tratará descrição e representação de forma como sinônimos.

Os métodos de descrição de forma resultam na extração de características que garantam a preservação de informações importantes da forma original (ZHANG; LU, 2004). O termo “importante” evidentemente é relacionado diretamente ao domínio do problema que está sendo tratado. Diversos extratores de características têm sido usados em métodos de descrição de forma como os baseados em momentos estatísticos, em análise de frequência e em histograma.

Em geral as qualidades desejadas nos métodos de descrição de forma são invariância a escala, translação e rotação. Esses requisitos são esperados porque, por definição, estas três transformações não alteram a forma geral (LONCARIC, 1998).

Os métodos envolvidos na análise de forma podem ser inicialmente divididos em dois ramos, baseados em contorno e baseados em região. Os baseados em contorno consideram apenas o contorno da forma na análise, já os baseados em região consideram o que estiver contido dentro do contorno, ou seja, em imagens, os pixels dentro do contorno.

Visto que o problema sendo tratado neste trabalho tem apenas o contorno de uma forma sem preenchimento, não lidaremos com métodos baseados em região.

Os métodos podem ainda ser divididos em duas categorias, os métodos estruturais, de abordagem discreta, e os métodos globais, também conhecidos como de abordagem contínua. Os métodos estruturais fragmentam a forma em segmentos ou regiões, também chamados de primitivas, e são as características de cada primitiva que formam o conjunto descritor da forma. Os métodos globais simplesmente tratam a forma como um todo para a extração de características. Na Figura 3-5 podemos ver a estrutura de classificação e exemplos de métodos baseados em contorno conforme classificados por Zhang & Lu (ZHANG; LU, 2004).

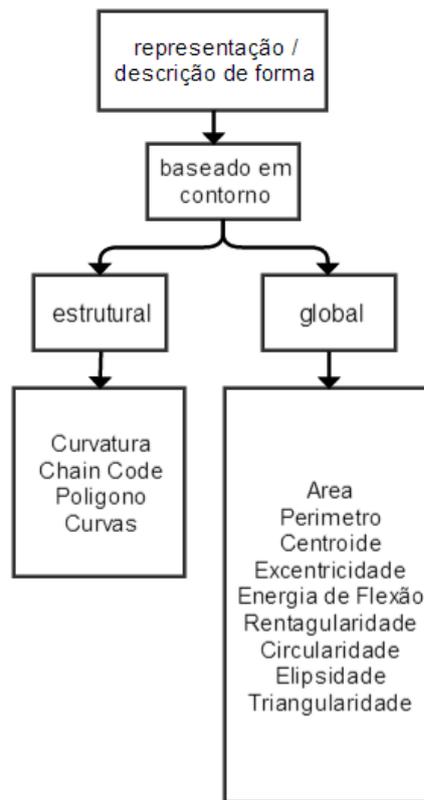


Figura 3-5: Classificação de métodos de análise de forma baseados em contorno. Adaptado de Zhang & Lu, 2004

### 3.4 Descritores de forma baseados no contorno global

As abordagens de contorno global não dividem a forma em partes, tratando todo o contorno simultaneamente gerando um simples vetor de características.

A equiparação entre formas com descritores de forma de contorno global é comumente um processo realizado através de alguma medida de distância. O resultado do descritor de forma geralmente é um vetor multidimensional e medidas como a Distância Euclidiana são usadas.

Descritores básicos como área, centroide e a proporção dos eixos principais não são recomendados como descritores isolados de forma. A aplicação desses descritores individualmente só consegue distinguir formas com grandes diferenças, portanto usados como filtros para eliminar as equiparações menos prováveis. Porém em conjunto com outras técnicas e outros descritores, eles podem ser usados para equiparar formas com grande eficiência. A proporção dos eixos principais é a razão entre os eixos principais de uma forma. A proporção dos eixos principais também é chamada de medida de excentricidade. Os eixos principais de uma forma podem ser definidos como segmentos de linha que se cruzam ortogonalmente no centroide e representam direções com zero correlação cruzada.

O *Bending Energy (BE)*, ou energia de flexão, é um descritor proposto em 1974 (BOWIE; YOUNG; WALKER, 1974), e que pode ser considerado um descritor mais avançado. A energia de flexão é definida na física como a energia necessária para a deformação de uma haste reta. Inspirado na definição da física, o contorno de uma forma pode ser descrito por sua energia de flexão definida na equação (1), onde  $K(p)$  é função de curvatura e  $P$  é o comprimento total do contorno. O círculo é a forma com a mínima energia de flexão. O método oferece uma medida simples e eficiente de distorção da forma.

$$BE = \frac{1}{P} \int_0^P |K(p)|^2 dp \quad (1)$$

Uma das características mais úteis dos métodos descritores de forma é a interpretação física que o vetor de características geradas pode oferecer, e o *Bending Energy* tem essa vantagem. Outros métodos são baseados em comparações geométricas, oferecendo uma métrica de quanto uma forma se parece com um círculo ou um retângulo o que é visualmente perceptível.

Assim muitos métodos foram desenvolvidos para oferecer métricas de circularidade, elipsidade, retangularidade e triangularidade, com resultados que variam na eficiência e complexidade a depender da abordagem usada. Os métodos geométricos são os mais básicos e intuitivos, como a medida de circularidade definida por  $P^2/A$ , onde  $P$  é o perímetro e  $A$  é a área do objeto.

Métodos estatísticos foram usados para oferecer medidas como a de circularidade (HARALICK, 1974; ZHANG; WENYIN, 2009), elipsidade (FLUSSER; SUK, 1993; PEURA; IIVARINEN, 1997) e retangularidade (ROSIN, 1999).

Métodos baseados no domínio da frequência, também chamados de descritores espectrais, são menos intuitivos, mas são considerados muito eficientes (CHAUDHURI, 2013). Os mesmos foram propostos, por exemplo, para medir elipsidade e circularidade (PROFFITT, 1982), e para descrever a forma genericamente (CHELLAPPA; BAGDAZIAN, 1984).

### 3.5 Descritores de forma baseados na estrutura do contorno

Os métodos estruturais fragmentam o contorno em segmentos, também chamados de primitivas. Diferem-se na abordagem de seleção das primitivas e na organização das primitivas para a descrição da forma.

Os resultados destes métodos são codificados numa sequência chamada de *String* no formato:  $S=s_1,s_2,\dots,s_n$ , onde  $s_i$  pode ser o lado de um polígono por exemplo e  $s_{i+1}$  pode conter atributos como comprimento, *bending energy*, orientação etc. A *String* pode ser usada diretamente para equiparação de formas, ou pode ser processada em um nível mais alto em um analisador sintático.

Entre os descritores desta categoria, existem os baseados em uma série de curvaturas resultantes dos pontos do contorno. A curvatura pode ser definida como a diferença entre os ângulos formados por dois pares adjacentes de pontos em relação a um eixo comum. Huang usa descritores de curvatura para equiparar formas em um sistema *Profile Hidden Markov Model* (HUANG, 2007). Nesse trabalho é sugerido o uso de um filtro para suavizar o contorno reduzindo os impactos do ruído. Dados três pontos consecutivos do contorno,  $P_{i-1}$ ,  $P_i$  e  $P_{i+1}$ , são definidos  $\vec{a} = \overrightarrow{P_{i-1}P_i}$  e  $\vec{b} = \overrightarrow{P_iP_{i+1}}$ , então a curvatura local será processada com a equação (2).

$$\theta_i = \text{sign}(\vec{a} * \vec{b}) \arccos\left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|}\right) \quad (2)$$

Depois de gerar a sequência de curvatura, uma amostragem pode ser realizada para reduzir a complexidade do conjunto. A estratégia sugerida é manter todos os extremos locais, por serem os pontos mais informativos, ou seja, são as características mais salientes, e manter também pontos igualmente espaçados. Esses pontos igualmente espaçados são úteis para a reconstrução da forma original.

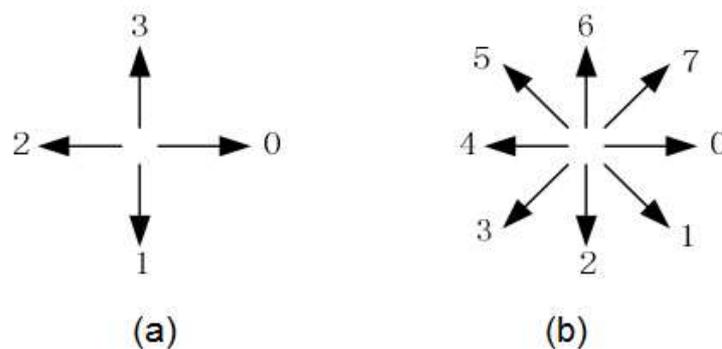


Figura 3-6: Códigos de sentidos de *Chain Code*: a – 4-direcional; b – 8-direcional

O *Chain Code* é outro método estrutural, e descreve uma forma por uma sequência de segmentos de linha de tamanho unitário com uma dada orientação. Foi introduzido por Freeman que apresentou um método para codificar configurações geométricas arbitrárias (FREEMAN, 1961). Na implementação original um contorno é superposto por uma grade, os

pontos do contorno são aproximados para o ponto mais próximo da grade, e assim uma amostragem da imagem é obtida. A partir de um ponto qualquer da forma amostrada um *Chain Code* é extraído usando um código 4-directional ou 8-directional, ou seja, de 4 ou 8 sentidos. Um código de  $N$  sentidos também é possível, sendo  $N > 8$  com  $N = 2^k$ , e é chamado *General Chain Code*.

Outras abordagens de *Chain Code* já foram apresentadas, como o *Chain Code Histogram* (CCH) e o CCH normalizado (NCCH) (IIVARINEN; VISA, 1996).

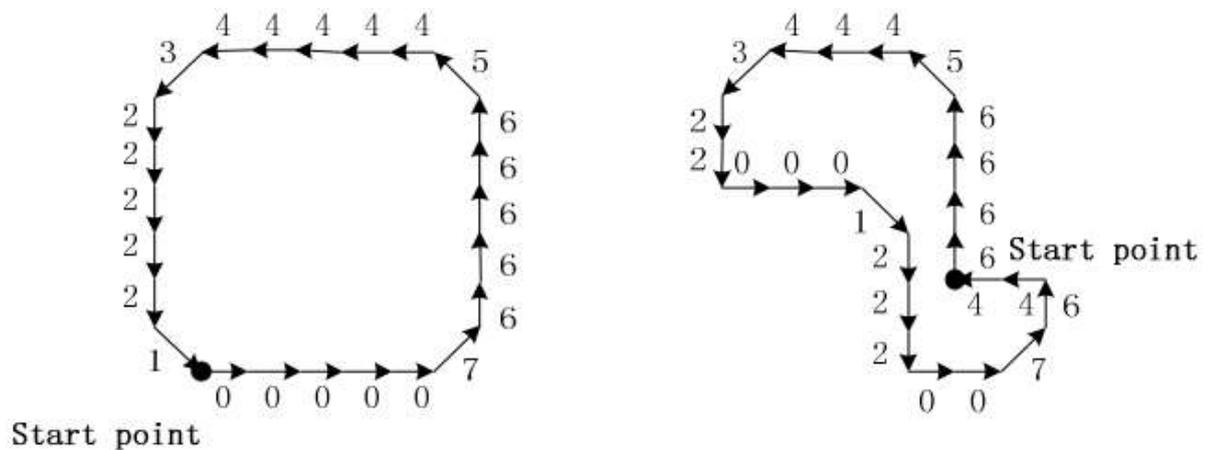


Figura 3-7: Exemplos de *Chain Code* de dois contornos. Fonte: Junding & Heli, 2009 (JUNDING; HELI, 2009)

A decomposição poligonal é outra abordagem estrutural. No trabalho de Grosky et al (GROSKY; MEHROTRA, 1990) (GROSKY; NEO; MEHROTRA, 1992) a decomposição poligonal desenvolvida particiona o contorno em segmentos de linha por aproximação poligonal e os vértices do polígono são usados como primitivas. As características de cada primitiva são expressas em uma *String* de 4 elementos, que são o ângulo interno, distância para o próximo vértice, e as coordenadas  $x$  e  $y$ .

A aproximação poligonal é realizada calculando a curvatura de cada ponto do contorno, o ângulo entre os segmentos com o ponto seguinte e o ponto anterior. E então a sequência de pontos ordenados com maior curvatura é encontrada. Por eficiência e robustez a forma é reduzida a um polígono de 5 vértices apenas.

Esse descritor de forma não tem invariância à rotação, translação e escala. A similaridade entre duas formas é dada pela distância de edição entre os dois vetores de características. A busca na base de dados é feita por característica e uma vez que haja similaridade de uma, então todas as características são comparadas diretamente com modelo armazenado.

Gary e Mehrotra usaram decomposição poligonal para extrair vértices de um polígono aproximado à forma como pontos de interesse (GARY; MEHROTRA, 1995). Dado uma forma com  $n$  pontos de interesse, um par de pontos adjacentes é escolhido para formar um vetor base. Todos os pontos de interesse são então transformados para o sistema de coordenadas criado pelo vetor base. 4 parâmetros são adicionados ao conjunto, que são o comprimento, posição  $x$  e  $y$  e ângulo do vetor base.

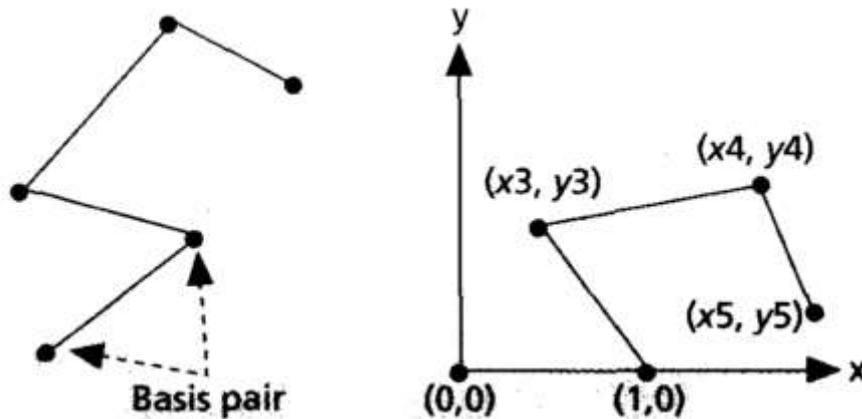


Figura 3-8: Exemplo de modificação de utilização de pontos adjacentes como vetor de coordenadas. À esquerda pontos adjacentes usados como vetores base. À direita demais pontos transportados para o sistema de coordenadas dos pontos base. Fonte Gary & Mehrotra, 1995

Para obter independência do ponto de interesse inicial, todos os pares de pontos adjacentes são usados como sistema de coordenadas sequencialmente. A similaridade entre dois conjuntos é obtida nesse caso por distância euclidiana. Os vetores de características da forma são armazenados numa árvore  $B$  de  $k$  dimensões, e a equiparação de formas ocorre por busca de cada característica na base de dados e quando há similaridade, as características da forma toda são então equiparadas com o modelo armazenado.

A decomposição em curvas é similar à decomposição poligonal, mas usa curvas suaves para descrever os pontos de maior curvatura da forma, ao invés de usar segmentos de linha entre os pontos. No trabalho de Berretti et al a forma é suavizada com filtro Gaussiano e pontos de curvatura zero são extraídos como pontos de interesse (PALA; DEL BIMBO; BERRETTI, 2000). A curvatura entre os pontos de interesse adjacentes é analisada e extraída como *tokens*, com informações de curvatura máxima e orientação como na Figura 3-9. A similaridade entre *tokens* é avaliada pela distância euclidiana ponderada. Como as características deste descritor incluem a orientação ele não é invariante a rotação, o problema é notado pelos autores, mas não solucionado.

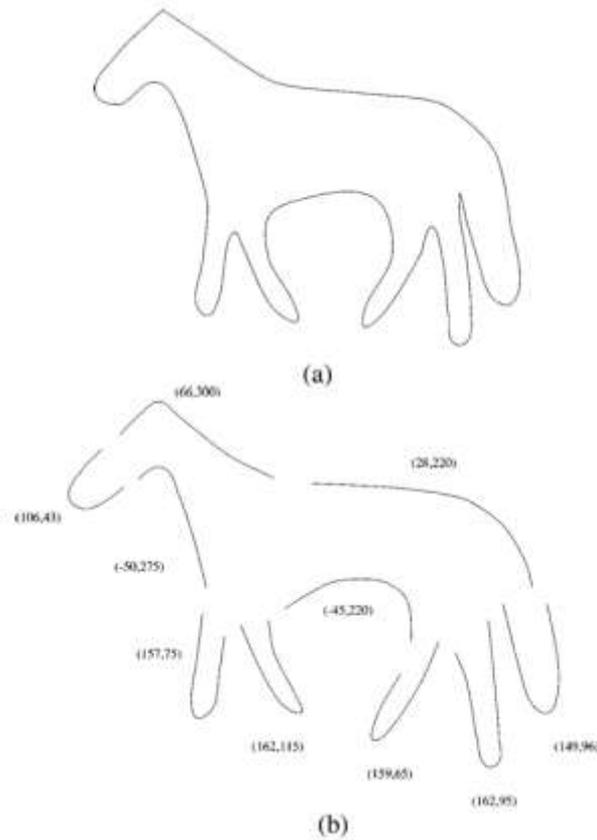


Figura 3-9: (a) forma de um cavalo; (b) a forma é decomposta nos pontos de curvatura mínima. Cada curva entre os pontos de curvatura mínima é armazenada como *tokens* no formato  $(m_k, \theta_k)$ , sendo  $m_k$  a curvatura máxima e  $\theta_k$  a orientação.

### 3.6 Discussão

Os métodos de contorno global podem ser muito precisos, ainda mais se combinados, mas existe sempre uma relação de troca entre exatidão e eficiência. Se por um lado a forma precisa ser descrita o mais detalhadamente possível, por outro a descrição precisa ser tão compacta quanto possível para simplificar a busca e a equiparação.

Descritores básicos de forma global podem ser muito compactos, mas são muito imprecisos, e precisam ser combinados para serem eficazes (CHAUDHURI, 2013; GRANLUND, 1972).

A extração eficiente de características em tempo de execução também é desejada nos projetos de classificadores e a relação da eficiência e exatidão é um problema fundamental.

São limitações importantes dos métodos de contorno global a dificuldade para lidar com a oclusão de parte da forma e com objetos articulados.

Geralmente os métodos empregados no problema da classificação das Cartas Dinamométricas são métodos de contorno global, e como já avaliamos em capítulos

anteriores, os resultados ficam limitados na quantidade de classes ou na exatidão dos resultados apresentados. Além disso, em geral os trabalhos não apresentam medidas de severidade das condições de bombeio classificadas e se restringem a resultados com apenas uma classe apesar das Cartas Dinamométricas apresentarem muitas vezes mais de uma condição de bombeio, ou seja, múltiplas classes.

Por outro lado temos os métodos estruturais, e o maior mérito dos mesmos a capacidade de lidar com problemas de oclusão das formas numa cena, permitindo a equiparação parcial. Assim como lida com problemas de oclusão, a abordagem estrutural também pode lidar com a equiparação de objetos articulados (GARY; MEHROTRA, 1995), como tesouras, alicates e até mesmo seres humanos, já que essencialmente o método equipara partes isoladas, permitindo comparar tesouras abertas, fechadas e entreabertas com eficácia similar sem a necessidade de uma busca exaustiva em uma biblioteca de imagens com tesouras nas mais diversas posições.

Por outro lado, os métodos estruturais têm algumas limitações, sendo a principal a definição de quantidade de primitivas nas formas, que geralmente é desconhecida, e precisa ser resolvida caso a caso (ZHANG; LU, 2004). O sucesso desse método depende do conhecimento prévio das formas sendo analisadas, e para muitos problemas isso não é uma opção. Outra desvantagem da abordagem estrutural é sua complexidade computacional que escala conforme a complexidade da forma. A vulnerabilidade a ruídos é também um problema para o método, pois ruídos na forma podem fazer com que estruturas falsas sejam criadas e analisadas no processamento.

Conforme revisão das condições de bombeio diagnosticáveis nas Cartas Dinamométricas de Fundo (CDF) realizada no item 2.3, características muito específicas são identificadas nos segmentos entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas, o que torna possível a análise da CDF por seus segmentos. Também é possível identificar que a relação de ângulos entre os segmentos pode mudar conforme o diagnóstico da condição de bombeio e sua severidade, e assim podemos identificar um problema de reconhecimento de formas articuladas.

Trabalhos recentes utilizaram segmentação no processo de classificação automatizada das CDFs, como no caso do uso dos segmentos do curso ascendente e do curso descendente do bombeio (DE LIMA; GUEDES; SILVA, 2009; SOUZA; BEZERRA, 2009). Outros pesquisadores também aplicaram segmentação, utilizando a localização aproximada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas, ou segmentos ao redor desses pontos (LI et

al., 2013). Apesar da segmentação nestes trabalhos os segmentos não foram analisados individualmente, e sim processados em conjunto por inteligências computacionais, o que não permite inferências específicas por segmento nem métricas quantitativas relativas as características reveladas pelos segmentos.

Reconhecendo na análise de CDF um problema de análise de seus segmentos e suas articulações podemos afirmar que há grande potencial na abordagem de análise de forma por estruturas do contorno.

## **4 A abordagem de análise de segmentos das Cartas Dinamométricas de Fundo para suporte ao diagnóstico do Sistema de Bombeio Mecânico**

Para superar as limitações identificadas na abordagem geralmente utilizada de análise do Sistema de Bombeio de fundo pela análise das Cartas Dinamométricas, este trabalho apresenta uma nova abordagem embasada em pesquisa realizada sobre análise de forma para reconhecimento de padrões. Enquanto os trabalhos na área apresentam resultados com limitações na quantidade de condições de bombeio possíveis de reconhecimento, esta nova abordagem pode ser aplicada para todas as condições de bombeio, ao mesmo tempo em que oferece o reconhecimento de anomalias concomitantes e ainda a possibilidade de inferir o grau de severidade de condições de bombeio por uma quantificação.

Para a análise das Cartas Dinamométricas de Fundo, geradas a partir de métodos tradicionais de conversão das Cartas Dinamométricas de Superfície, este trabalho apresenta um novo método de segmentação das mesmas através da identificação aproximada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas, e na sequência testa a classificação através da análise dos segmentos extraídos para reconhecimento das condições de bombeio.

### **4.1 Segmentação da CDF pela identificação aproximada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas**

A identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas foi tratada no passado por outros pesquisadores, através da identificação de vértices na forma das Cartas Dinamométricas (HUA; XUNMING, 2011), mas o método apresentado além de complexo não apresenta resultados para as formas possíveis de todas as condições de bombeio representáveis nas Cartas Dinamométricas.

No método aqui apresentado, a identificação dos pontos de interesse é feita indiretamente pela identificação dos segmentos que conectam estes pontos, o que torna o processo mais robusto, pois como será demonstrado, a CDF pode ser dividida em quatro segmentos principais com boa precisão, e os pontos de abertura e fechamento de válvulas são encontrados na conexão destes segmentos.

A segmentação das Cartas Dinamométricas de Fundo aqui apresentada é feita pela identificação aproximada dos pontos de abertura e fechamento das válvulas, através de aproximação poligonal, utilizando um método descritor de forma baseada no *Chain Code*. O método oferece robustez para lidar com CDF de formas muito diferentes das formas típicas

das classes, além de ter baixa complexidade, facilitando a programação e potencializando até mesmo o uso em sistemas embarcados para diagnósticos em tempo real.

#### 4.1.1 Forma geral das Cartas Dinamométricas de Fundo e seus segmentos

Para que seja usada a abordagem de análise de forma por estruturas do contorno é preciso vencer uma limitação importante, a quantidade de estruturas esperadas nas formas. No caso específico das CDFs temos a vantagem de poder definir estas estruturas esperadas uma vez que entendemos a forma geral que a CDF deve assumir, portanto entendemos os segmentos que se apresentam em seu contorno.

A forma geral das CDFs é um contorno fechado que representa um ciclo de bombeio. A mesma pode ser analisada do ponto de vista do comportamento da carga conforme o pistão de desloca no Sistema de Bombeio Mecânico, realizando o movimento ascendente e descendente para completar um ciclo de bombeio.

A seguinte sequência é representada nas CDFs, tendo seu início definido como o segmento de carregamento de forma arbitrária e considerando uma condição de bombeio normal:

1. Segmento de carregamento: o pistão é deslocado para cima reduzindo a pressão dentro da camisa e aumentando a carga medida no dinamômetro. Geralmente ocorre apenas no início do curso ascendente do pistão.
2. Segmento de carga estável no curso ascendente do pistão: o deslocamento do pistão ocorre sem grandes variações de carga.
3. Segmento de descarregamento: o pistão é deslocado para baixo, aumentando a pressão dentro da camisa e reduzindo a carga medida no dinamômetro. Geralmente ocorre apenas no início do curso descendente do pistão.
4. Segmento de carga estável no curso descendente do pistão: novamente o deslocamento do pistão ocorre sem grandes variações de carga.

Estes segmentos principais, aqui interpretados como 4 estágios do bombeio, identificados dentro de cada ciclo de bombeio, podem então ser reconhecidos na forma da CDF, observando-se a variação de carga em relação à variação do deslocamento do pistão.

1. Segmento de carregamento: a variação de carga é positiva e é maior que a variação do deslocamento do pistão.
2. Segmento de carga relativamente estável no curso ascendente do pistão: a variação do deslocamento do pistão é positiva e maior que a variação da carga.

3. Segmento de descarregamento: a variação de carga é negativa e é maior que a variação de deslocamento do pistão
4. Segmento de carga estável no curso descendente do pistão: a variação do deslocamento do pistão é negativa e maior que a variação da carga.

Estes segmentos descritos podem ser então identificados nas CDFs ao tratarmos as mesmas pelo seguinte processo.

Para contornar diferenças entre os poços de origem, como diferenças na profundidade, as CDFs são tratadas em um processo de normalização, o que faz seus valores variarem entre 0 e 1 (Figura 4-1). Esse processo de normalização permite interpretar toda CDF como se a mesma estivesse dentro de um quadrado e então as taxas de variação de carga em relação à variação do deslocamento podem ser reconhecidas pelo ângulo formado entre cada ponto sequencial em relação ao eixo do deslocamento.

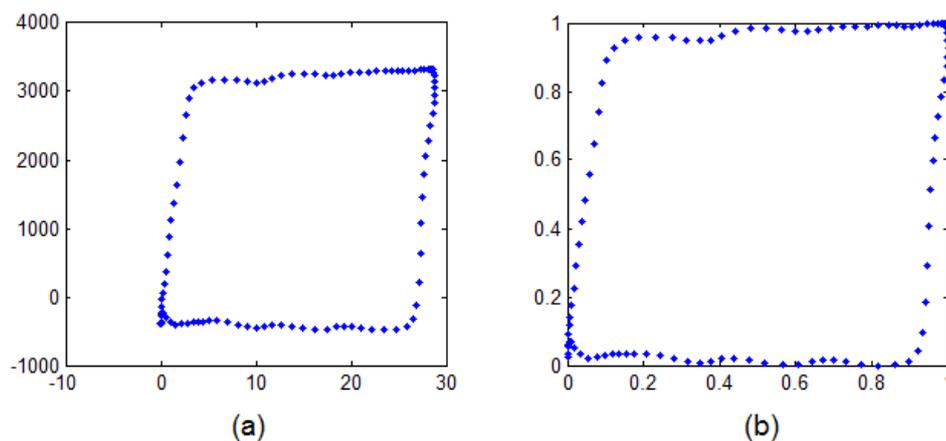


Figura 4-1: Exemplo de normalização de uma CDF: a - CDF original; b – CDF após normalização.

Como temos 4 segmentos com 4 sentido distintos, para cima, para a direita, para baixo e para esquerda, podemos analisa-los por seus valores angulares conforme Figura 4-2. Assim o segmento de carregamento terá valores angulares entre seus pontos de  $45^\circ$  a  $135^\circ$ , o segmento de estabilidade da carga na ascendência terá valores entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$  e entre  $315^\circ$  e  $360^\circ$ , o segmento de descarregamento terá valores entre  $225^\circ$  e  $315^\circ$ , e por fim o segmento de estabilidade da carga na descendência terá valores entre  $135^\circ$  e  $225^\circ$ .

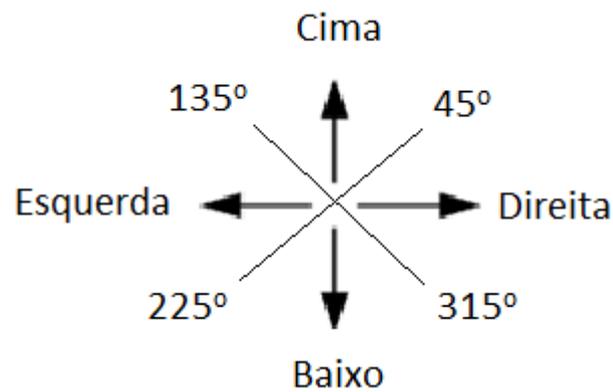


Figura 4-2: Demonstração de análise angular dos segmentos das Cartas Dinamométricas.

Com a definição de quatro sentidos e os ângulos esperados dos mesmos podemos identificar computacionalmente os segmentos dos 4 estágios de bombeio citados nas CDF, e mesmo considerando que as CDF podem ter deformidades diversas podemos contar com técnicas de computacionais de filtragem dessas deformidades. Na Figura 4-3 diversas CDFs de diferentes condições de bombeio são interpretadas utilizando esses 4 sentidos.

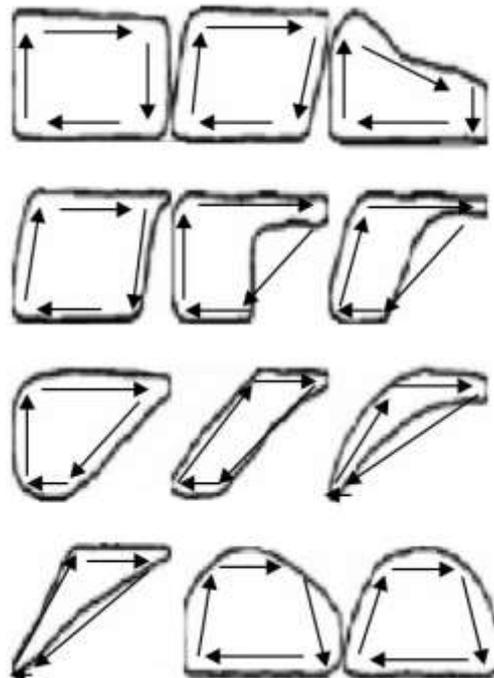


Figura 4-3: Interpretação aproximada dos quatro estágios do ciclo de bombeio em CDFs de diferentes condições de bombeio.

Conforme o funcionamento do SBM, os pontos de conexão entre segmentos de sentidos diferentes, ou simplesmente os vértices do quadrilátero identificado por estes vetores, são os pontos de abertura e fechamento das válvulas do sistema que estão sendo buscados.

Por outro lado como pode ser observado na Figura 4-3, a aproximação das formas de algumas condições de bombeio é mais complicada, pois a forma geral original apresenta mais vértices e curvaturas que a distanciam do quadrilátero apresentado pela condição de bombeio ideal.

Para a devida análise de forma por estruturas do contorno é importante uma boa definição da quantidade de estruturas procuradas, e assim é importante considerar como as diversas anomalias conhecidas do sistema de bombeio podem afetar os segmentos dos estágios de bombeio nas CDFs, e avaliar formas alternativas ao quadrilátero da forma ideal.

Como analisado no item 2.3, diversas condições de bombeio podem interferir nesses segmentos causando distorções muito específicas, no entanto podemos considerar que essas distorções em geral não afetam o sentido médio esperado dos segmentos, com exceção de algumas formas de condições *Pump Off*, ou seja, condições de bombeio parcial ou total fora do fluido na camisa (Figura 4-4).

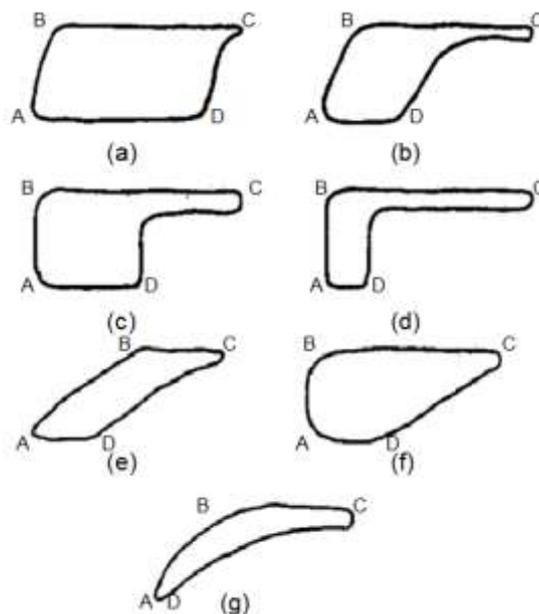


Figura 4-4: Exemplos de CDFs de condições *pump off*.

Como pode ser observado na Figura 4-4-b, que apresenta uma condição de bombeio *Pump Off* grave, o segmento de descarregamento da CDF, entre C e D, pode ser interpretado como tendo um ângulo médio próximo de  $225^\circ$ . Por outro lado se o segmento de descarregamento desta mesma figura for interpretado como sendo de 3 subsegmentos, podem ser inferidos ângulos médios muito diferentes, com valores próximos de  $260^\circ$  e  $180^\circ$ . Em condições de bombeio *pump off* consideradas menos graves, como na Figura 4-4-a, o

segmento *CD* pode ser interpretado com ângulos médios similares seja visto como um segmento só ou como tendo 3 subsegmentos.

Assim, buscando uma maior eficiência em um processo de aproximação poligonal para segmentação, é importante considerar outra forma que se aproxime mais das condições *pump off*, a partir da distinção identificada no segmento de descarregamento.

Nas condições *Pump Off*, o segmento de descarregamento apresentará um momento de estabilização da carga, que representará principalmente o peso do pistão e fluido acima dele devido à falta de suporte abaixo. O tamanho desse subsegmento de estabilidade da carga será tão grande quanto o deslocamento necessário para o pistão, na descida, encontrar o fluido dentro da camisa ou o fundo da mesma.

Enfim, o segmento de descarregamento em geral pode ser aproximado por um segmento de reta para baixo, mas, caso a interferência causada pela falta de preenchimento da camisa crie um segmento de estabilidade, o mesmo pode ser mais aproximado para a seguinte descrição geral:

1. Um segmento para baixo, representando a descida da carga até o valor que representará principalmente o peso do pistão e fluido acima dele, e que é um valor mais próximo do valor máximo de carga conforme percebido na literatura e nas amostras de poços reais.
2. Um segmento para a esquerda, representando a descida do pistão e a carga estável.
3. Um novo segmento para baixo, representando a descarga para o fluido, ou para o fundo da camisa, ou ainda para gases dentro da camisa. Caso haja a interferência de gás o segmento apresentará mais curvatura, mas ainda será um descarregamento, e poderá ser aproximado a uma reta para baixo.

Através então da análise acima apresentada, podemos então afirmar que a forma geral das CDFs pode ser aproximada mais facilmente a dois polígonos básicos:

- Quadrilátero, devido à forma geral de 4 sentidos das condições de bombeio cheio, como pode ser visto na Figura 4-5-a.
- Hexágono côncavo, devido à forma das condições *Pump Off* mais graves, como pode ser visto na Figura 4-5-b.

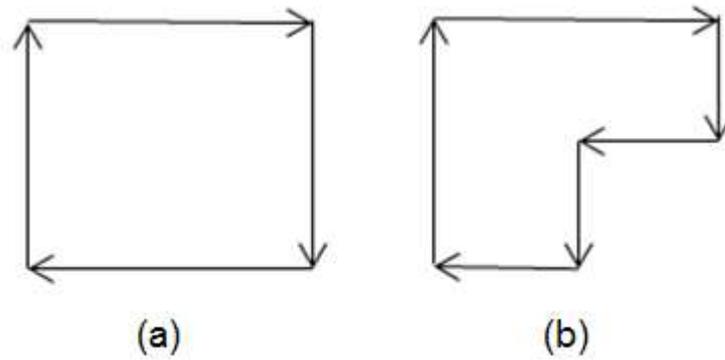


Figura 4-5: Polígonos predefinidos por análise para a aproximação poligonal de qualquer CDF

#### 4.1.2 Descrição de forma por *Chain Code*

O *Chain Code* descreve o contorno de um objeto por uma sequência de vetores de tamanho unitário e um conjunto limitado de sentidos (ZHANG; LU, 2004). É um método de análise de forma baseado em primitivas do contorno da mesma. De um ponto de início arbitrário, um *Chain Code* pode ser gerado usando um código *4-connected* (4 sentidos) (Figura 4-6), *8-connected* (8 sentidos) ou mais.

Neste trabalho é utilizado o *Chain Code* para aproximar a forma da Carta Dinamométrica a um dos dois polígonos básicos predefinidos, um quadrilátero ou um hexágono côncavo, baseados na análise da forma geral da CDF realizada no item 4.1.

Ambos os polígonos são formados por apenas 4 sentidos possíveis e dessa forma o *Chain Code* é gerado usando apenas 4 sentidos.

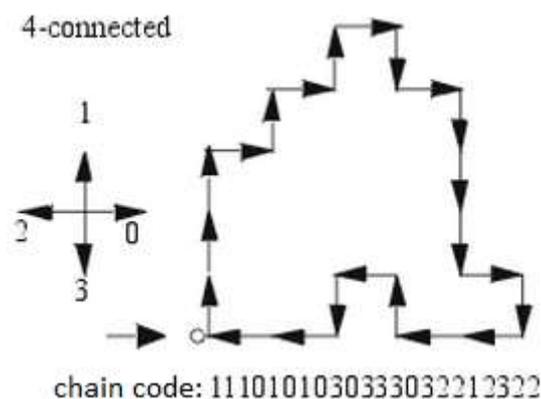


Figura 4-6: Demonstração de *Chain Code* 4-connected

As CDFs tem  $N$  pontos, cada ponto possui um valor de deslocamento  $d_n$ , usualmente expresso em polegadas (pol), e um valor de carga,  $c_n$ , usualmente expressa em libras-força

(lbf). O conjunto correspondente aos dados das Cartas disponibilizados pode ser representado como na equação (3).

$$X = [(d_1, c_1), (d_2, c_2), \dots, (d_N, c_N)] \quad (3)$$

Os valores possíveis de deslocamento e de carga das CDFs podem variar a depender dos poços que se originam, conforme a variação da profundidade, vazão e tamanho de componentes. Assim, uma operação de normalização é realizada como pré-processamento para permitir a generalização para execução dos métodos posteriores.

Para cada  $n$ -ésimo ponto da carta  $(d_n, c_n)$ ,  $n=1..N$ , temos:

$$d_n = d_{n_{normalizado}} = \frac{d_n - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (4)$$

$$c_n = c_{n_{normalizado}} = \frac{c_n - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} \quad (5)$$

Onde  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ ,  $c_{min}$ ,  $c_{max}$ , são os valores mínimos e máximos de deslocamento e carga da CDF. Com a normalização todos os valores do conjunto de pontos da CDF passam a variar entre 0 e 1, e o resultado pode ser visto na Figura 4-7-b.

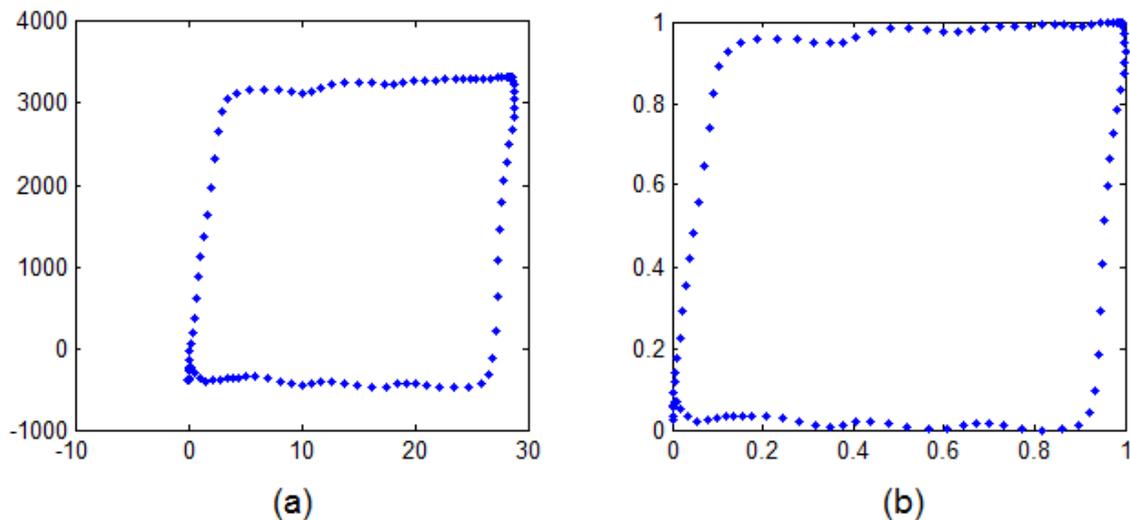


Figura 4-7: Exemplo de normalização de uma CDF: a - CDF original; b - CDF após normalização.

Antes de extrair os ângulos é importante normalizar também a distância entre os pontos na CDF. A distância entre os pontos na CDF original pode ser usada para inferir velocidade de deslocamento, porém esta não é uma informação relevante nessa abordagem de análise assim como não costuma ser usada na análise visual realizada pelos especialistas na área. Tornar os pontos na CDF equidistantes torna a extração de estatísticas diversas mais prática e confiável, além de também filtrar pequenas distorções.

Para a normalização da distância entre os pontos precisamos do comprimento total da Carta Dinamométrica ( $comp$ ) que é a soma de todos os valores de distância entre pontos  $dist_n$  calculados com a equação (6). A nova distância final entre os pontos será  $dep=comp/N$ .

A partir da nova distância entre os pontos é construído um vetor que terá o comprimento do trecho formado por cada novo ponto com o ponto inicial ( $ndist_j$ ), como na equação (7). Assim, para cada comprimento de trecho em  $ndist_j$  será localizado por ordem crescente o índice do primeiro ponto original que tenha maior comprimento de trecho original para o ponto inicial ( $ipmdistn$ ), e a partir dele será calculado cada novo ponto como nas equações (8) e (9), com exceção do primeiro ponto, que continuará o mesmo.

$$dist_n = \sqrt{((d_n - d_{n-1})^2 + (c_n - c_{n-1})^2)} \text{ para } n > 1 \quad (6)$$

$$ndist_j = dep + ndist_{j-1} \quad (7)$$

$$d_{n_{novo}} = (\cos(\text{atan2}(d_n - d_{n-1})) * (ndist_n - distn_{ipmdistn-1}) + d_{n-1} \quad (8)$$

para  $n > 1$

$$c_{n_{novo}} = (\text{sen}(\text{atan2}(c_n - c_{n-1})) * (ndist_n - distn_{ipmdistn-1}) + c_{n-1} \quad (9)$$

para  $n > 1$

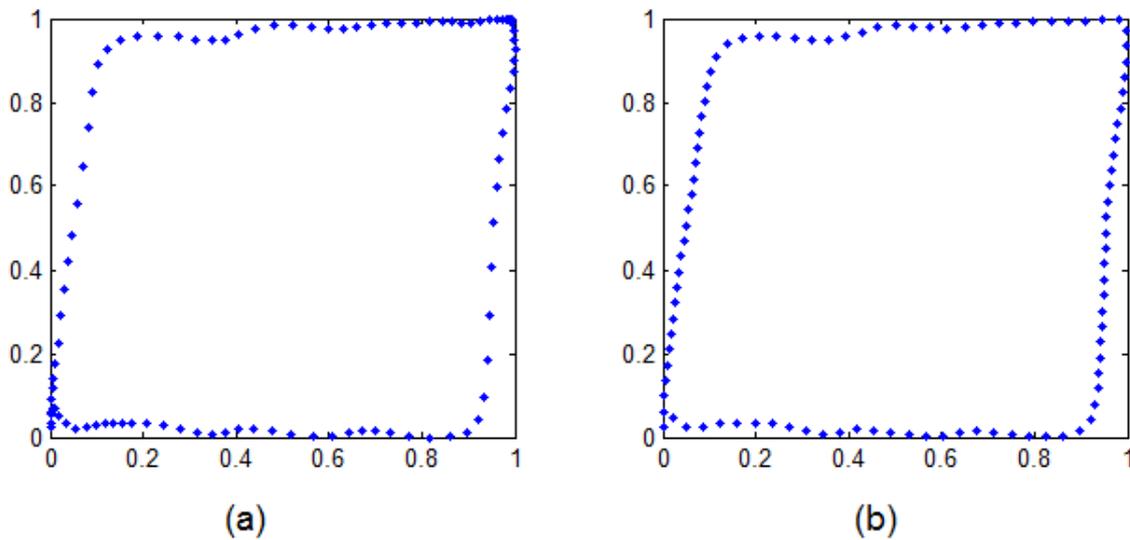


Figura 4-8: Exemplo de distribuição equidistante dos pontos da CDF original (a) e resultado em (b).

A partir do conjunto de pontos normalizado é extraído então o conjunto de ângulos de cada linha formada por cada dois pontos sequenciais em relação ao eixo do deslocamento, conforme equação (10) e (11). A Figura 4-9 demonstra o ângulo de alguns pontos em uma CDF com valores  $180^\circ$  e  $-180^\circ$ .

$$ang_n = atan2\sqrt{(d_n - d_{n-1})^2 - (c_n - c_{n-1})^2} \text{ para } n > 1 \tag{10}$$

$$ang_n = atan2\sqrt{(d_n - d_N)^2 - (c_n - c_N)^2} \text{ para } n = 1 \tag{11}$$

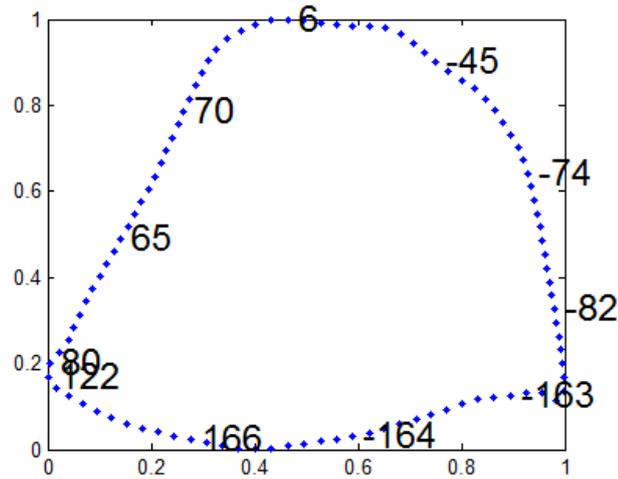


Figura 4-9: CDF com ângulos exibidos a cada 10 pontos como exemplo

Finalmente, a partir do conjunto de ângulos é gerado o conjunto do *Chain Code* conforme equação (12). Cada ponto será associado a um sentido identificado por um dos códigos: 0, 1, 2, 3. Para facilitar a análise os mesmos são denominados respectivamente: cima, direita, baixo e esquerda. Na Figura 4-10 temos uma CDF com o sentido de cada ponto.

$$code_n = \begin{cases} 0 \text{ caso } -45^\circ < a_n < 45^\circ \\ 1 \text{ caso } 45^\circ \leq a_n \leq 135^\circ \\ 2 \text{ caso } a_n > 135^\circ \\ 3 \text{ caso } a_n \leq -135^\circ \end{cases} \tag{12}$$

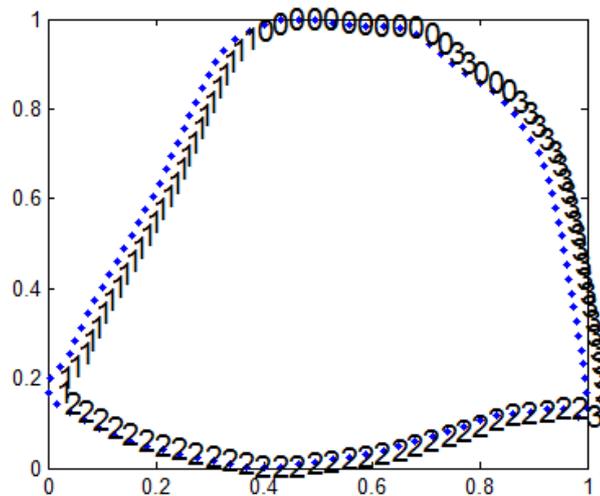


Figura 4-10: Sentido de cada ponto de um CDF através do *Chain Code* 4-connected

### 4.1.3 Aproximação poligonal

As formas das classes de CDF analisadas no item 2.3 podem ser aproximados em dois polígonos diferentes, sendo um quadrilátero, para as classes de bombeio cheio, ou um hexágono côncavo para alguns formatos de classes em que o pistão sai total ou parcialmente do fluido na camisa, chamados de *Pump Off*.

A Figura 4-11 mostra o formato geral dos polígonos predefinidos. Na figura os lados são exibidos com ângulos retos entre eles, mas logicamente os ângulos dos lados dos polígonos poderão variar conforme os ângulos das 4 sentidos utilizadas no *Chain Code*, como na Figura 4-12.

Para esta aproximação os lados dos polígonos podem ter qualquer tamanho com exceção da relação entre dois dos lados do hexágono côncavo. O hexágono côncavo foi projetado para ser aproximado a CDFs *pump off*, porém é possível que o mesmo seja aproximado acidentalmente à forma da classe Batida na Parte Inferior por ter também dois segmentos de descarregamento, apesar de um deles ser muito pequeno. Na forma geral das condições de bombeio *pump off*, em que a bomba pistão sai total ou parcialmente do fluido da camisa, o primeiro segmento de descida é menor que o segundo segmento descida, conforme observado em 6132 Cartas Dinamométricas de poços de uma biblioteca de Cartas classificadas por especialistas fornecida pela Petrobras para estudos no Programa de Pós Graduação em Mecatrônica da UFBA. Assim, para contar com a vantagem de se inferir uma condição *pump off* ao se identificar uma aproximação para hexágono côncavo, é preciso analisar a relação de tamanho entre os dois segmentos de descarregamento, e caso se confirme que o primeiro é menor que o segundo, como no hexágono da Figura 4-11, teremos efetivamente uma condição *pump off*, e a aproximação para hexágono côncavo poderá ser concluída.

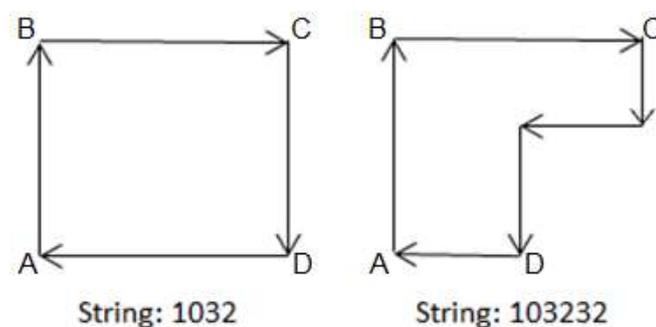


Figura 4-11: Polígonos predefinidos na aproximação poligonal das Cartas Dinamométricas de Fundo e as *Strings* que os representam.

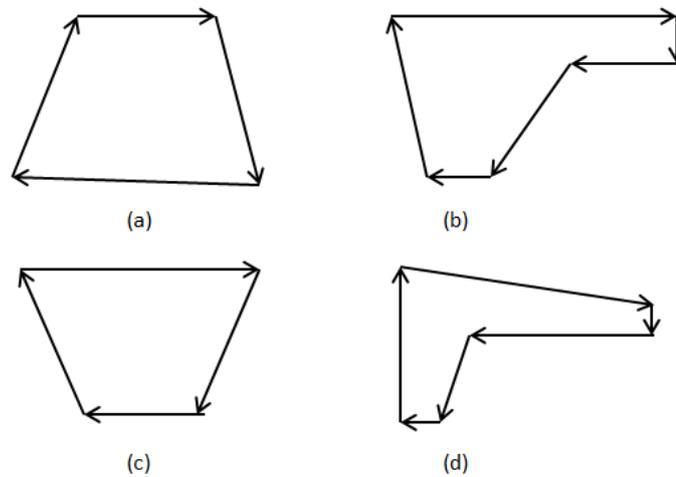


Figura 4-12: Formas possíveis dos polígonos predefinidos na aproximação das CDFs: a – quadrilátero similar à classe Vazamento na Válvula de Passeio; b – hexágono similar à classe Pancada de Fluido com indícios de Vazamento na Válvula de Pé e Interferência de Gás; c – quadrilátero similar à classe Vazamento na Válvula de Pé; d – Hexágono similar à classe Pancada de Fluido com indício de Poço Surgente.

Para realizar a aproximação o *Chain Code* extraído da CDF é processado para se remover as repetições sequenciais criando assim um vetor chamado aqui de *String*. Assim o *Chain Code* exemplo: 1110101030333032212322 se torna a *String*: 1010103030321232 que não tem nenhum código repetido na sequência. É então a *String* que será analisada para identificar o polígono aproximado.

As classes de CDF têm grande variação de forma e as CDFs reais estão sujeitas a diversas distorções, como ruídos no processo de aquisição ou combinações entre múltiplas anomalias, portanto a aproximação poligonal pode precisar de alguns ciclos de filtragem até que a CDF tenha a forma de um dos polígonos definidos.

No processo a *String* extraída do *Chain Code* é comparada com as *Strings* dos polígonos predefinidos para aproximação, 1032 ou 103232, conforme Figura 4-11, e caso não seja idêntica a um dos dois, um ciclo de filtragem é realizado na CDF. O filtro utilizado é um simples filtro de média, que gera um novo enésimo valor de deslocamento e de carga a partir da média dos valores de deslocamento e carga do ponto em questão com os pontos anterior e posterior.

$$d_{n_{filtrado}} = \frac{d_{n-1} + d_n + d_{n+1}}{3} \text{ para } 1 < n < N \quad (13)$$

$$c_{n_{filtrada}} = \frac{c_{n-1} + c_n + c_{n+1}}{3} \text{ para } 1 < n > N \quad (14)$$

Uma vez que a *String* da CDF seja idêntica a *String* de um dos polígonos predefinidos, a consistência dos segmentos de descarregamento (para baixo) precisa ser confirmada conforme citado acima. A confirmação ocorre simplesmente verificando se o primeiro segmento para baixo é menor que o segundo segmento para baixo, calculando o tamanho dos segmentos somando o vetor resultante da equação (6), que tem a distância entre os pontos,  $n=1\dots N$ , com  $N$  sendo a quantidade de pontos no segmento. Se o primeiro segmento para baixo for menor que o segundo, o processo de aproximação estará concluído, caso contrário outro ciclo será iniciado. Na Figura 4-13 é demonstrada uma CDF original e a CDF após alguns ciclos de filtragem, onde se pode observar que a forma geral da carta é mantida. O mesmo pode ser visto também na Figura 4-14.

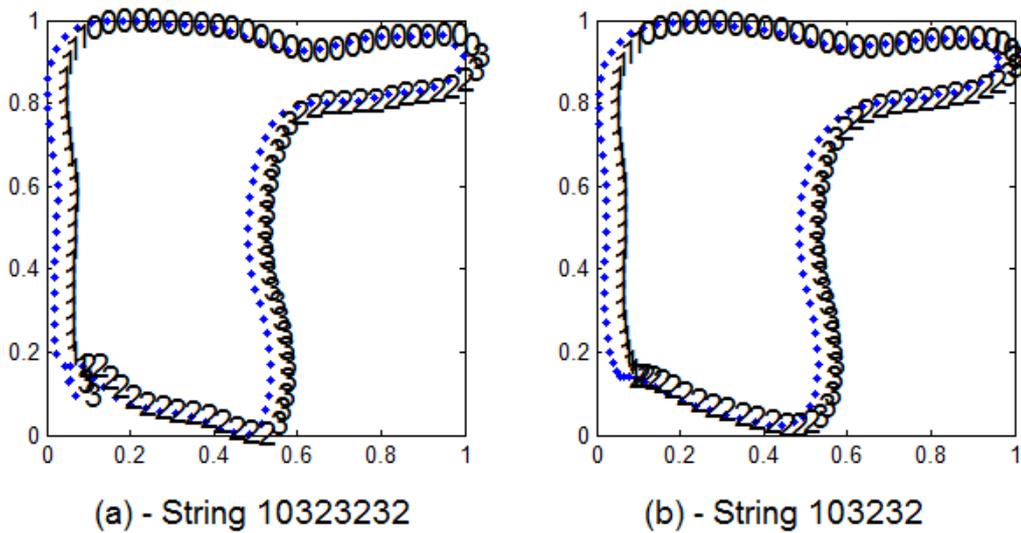


Figura 4-13: Processo de filtragem para decomposição em polígono de CDF da classe Pancada de Fluido de um poço real: a – CDF original com *Chain Code* e *String*; b – CDF filtrada até que a *String* seja idêntica à *String* de um dos polígonos pré-definidos.

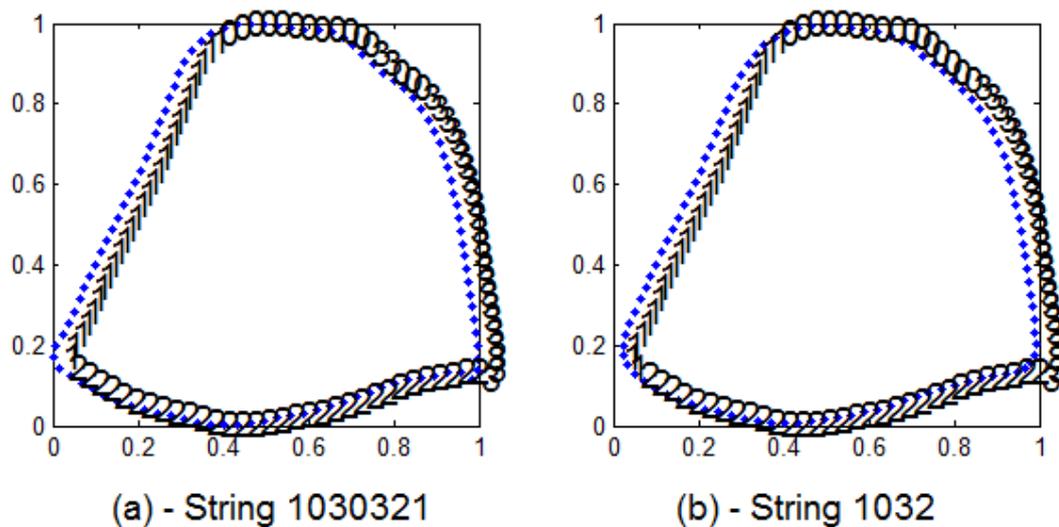


Figura 4-14: Processo de filtragem para aproximação poligonal de CDF artificial de Vazamento da Válvula de Passeio: a – CDF original com *Chain Code* e *String*; b – CDF filtrada até aproximação poligonal, com *Chain Code* e *String*.

#### 4.1.4 Extração dos pontos de abertura e fechamento das válvulas

A partir do *Chain Code* da CDF aproximada a um dos polígonos predefinidos é realizada a decomposição do polígono extraindo seus lados e identificando os pontos de início e fim dos mesmos, seus vértices, para então utilizar estes pontos na análise da CDF original.

Conforme a análise compreensiva das classes de CDF, os pontos de abertura de fechamento de válvulas vão ser definidos a depender do polígono a que a CDF foi aproximada.

Caso a CDF seja aproximada em um quadrilátero:

- O último ponto do segmento para cima será o ponto de abertura da Válvula de Pé;
- O último ponto do segmento para a direita será o ponto de fechamento da válvula pé;
- O último ponto do segmento para baixo será o ponto de abertura da Válvula de Passeio;
- O último ponto do segmento para a esquerda será o ponto de fechamento da Válvula de Passeio.

Caso a CDF seja aproximada em um hexágono côncavo:

- O último ponto do segmento para cima será o ponto de abertura da Válvula de Pé;
- O último ponto do segmento para a direita será o ponto de fechamento da válvula pé;
- O último ponto do segundo segmento para baixo será o ponto de abertura da Válvula de Passeio;

- O último ponto do segundo segmento para a esquerda será o ponto de fechamento da Válvula de Passeio.

A Figura 4-15 apresenta um fluxograma do processo de identificação dos pontos de abertura e fechamento das válvulas pela decomposição poligonal.

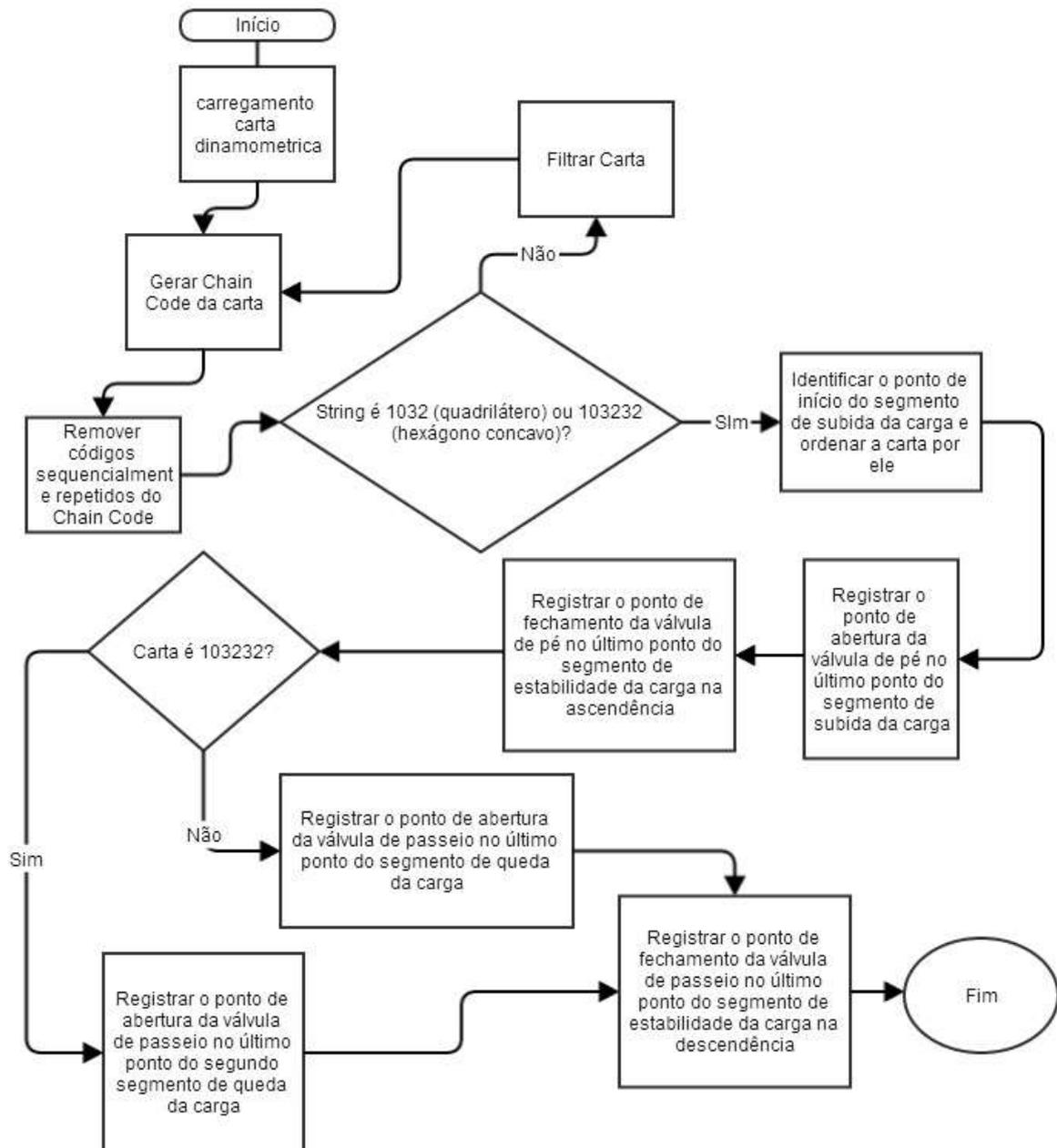


Figura 4-15: Fluxograma de identificação dos pontos de abertura e fechamento de válvulas

Testes foram realizados sobre 300 CDF de diversas formas de todas as classes relevantes (11 classes). O método não foi testado sobre todas as 16 classes possíveis, pois 5 delas podem ser reconhecidas facilmente e não precisam ser tratadas por esta abordagem

como será discutido em tópico posterior. Em uma minoria foi observado que o índice dos pontos poderia estar aproximado por até 2 pontos, mas para o objetivo dessa abordagem esse ajuste é irrelevante pois se admite que os pontos são aproximados. Além disso, como as CDFs testadas são formadas por 100 pontos, uma aproximação de 2 pontos indica grande precisão.

Na Figura 4-16 pode ser visto o resultado do método em diversas CDFs de 8 classes, selecionadas pelo grande diferença de forma entre elas, ilustrando os pontos de abertura e fechamento de válvulas.

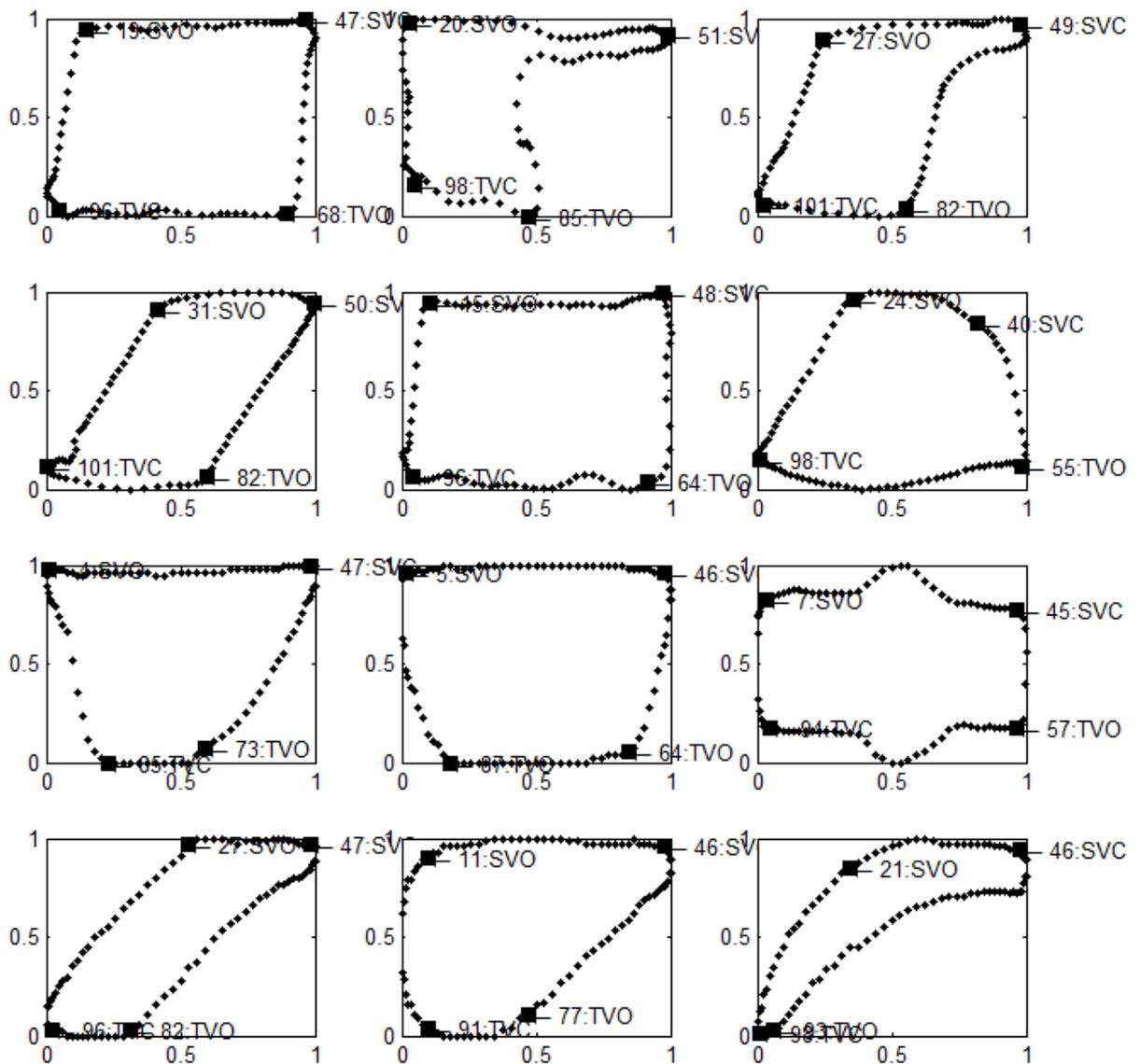


Figura 4-16: CDF de diversas classes com os pontos de abertura e fechamento de válvulas demarcados conforme resultado do algoritmo deste trabalho SVO é a abertura da Válvula de Pé, SVC é o fechamento da Válvula de Pé, TVO é a abertura da Válvula de Passeio e TVC é o fechamento da Válvula de Passeio.

## 4.2 Testes de classificação das CDFs pela análise de segmentos

Para avaliar o potencial de classificação da nova abordagem apresentada, foi desenvolvido um conjunto de classificadores, um para cada condição de bombeio que se pretende identificar, ou seja, um para cada classe. Para o desenvolvimento dos classificadores foram usadas Cartas Dinamométricas de Fundo (CDF) artificiais geradas a partir de figuras de todas as classes encontrada na literatura como no trabalho de KEATING, LAINE, JENNINGS (1991), e principalmente CDF de poços reais de uma biblioteca de Cartas classificadas por especialistas, fornecida pela Petrobras para estudos no Programa de Pós Graduação em Mecatrônica da UFBA, contendo Cartas de 5 classes, sendo:

- 1863 CDF da classe Normal
- 4120 CDF da classe Pancada de Fluido
- 48 CDF da classe Batida na Parte Superior
- 17 CDF da classe Interferência de Gás
- 84 CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio

Como será demonstrado a seguir, os classificadores usam estatísticas de características de segmentos das CDFs e lógica Fuzzy para mensurar o grau de pertinência de uma determinada CDF nas diversas classes. Para a geração das estatísticas é importante a maior quantidade possível de amostras dos segmentos das CDFs devido a grande variedade de forma que as mesmas podem apresentar, mas não temos garantiam de que as amostras de CDFs de poços reais disponíveis representam todas as formas possíveis de todas as classes, portanto o uso de CDFs artificiais geradas a partir da literatura é de fundamental importância. Por outro lado, foram criados classificadores usando apenas CDFs geradas artificialmente devido a falta de amostras reais, que apesar de não poderem ser testados pela confirmação da pré-classificação positiva de amostras reais, são importantes ao confirmar a classificação negativa de CDFs de outras classes, além de eventualmente classificar positivamente uma CDF pré-classificada como de outra classe, revelando uma inconsistência na pré-classificação ou uma CDF de múltiplas classes.

Conforme analisado no item 2.3, algumas classes de CDF são reconhecíveis por características dos segmentos entre os pontos de abertura e fechamento de válvulas, enquanto outras são reconhecíveis por características de subsegmentos específicos dentro dos segmentos principais, por exemplo, um subsegmento de queda de carga no segmento de carregamento ou um subsegmento côncavo dentro de um segmento que deveria apresentar

somente estabilidade de carga. Assim, na abordagem aqui apresentada, a classificação de algumas das classes é feita por algoritmos que analisam subsegmentos específicos nos segmentos principais das cartas, e características desses subsegmentos. Além disso, segundo o trabalho de Bezerra (BEZERRA, 2010), algumas classes são reconhecíveis por estatísticas básicas calculadas antes da normalização dos valores dos pontos, como uma média negativa de carga, ou uma amplitude mínima de deslocamento, portanto as cartas destas classes são filtradas pela análise de Bezerra em pré-processamento na abordagem aqui apresentada, e não serão processadas pelos classificadores aqui desenvolvidos.

As seguintes classes são especificadas por características dos segmentos principais:

- Normal
- Interferência de Gás
- Vazamento na Válvula de Pé
- Vazamento na Válvula de Passeio
- Fricção

As seguintes classes são especificadas por características de subsegmentos específicos nos segmentos principais:

- Ancoragem Deficiente
- Pancada de Fluido
- Batida na Parte Superior da Bomba
- Batida na Parte Inferior da Bomba
- Camisa Abaulada
- Camisa Desgastada ou Furada

E as seguintes classes são especificadas pelo método de Bezerra, que se baseia em regras de lógica sobre estatísticas básicas antes da normalização dos valores dos pontos da CDF (BEZERRA, 2010):

- Poço Surgente
- Pistão Preso
- Válvula de Pé Emperrada
- Bomba Gasta
- Haste partida

#### 4.2.1 Extração de características dos segmentos e análise de normalidade de CDF

Como será descrito a seguir um classificador baseado em lógica *Fuzzy* foi criado para analisar o grau de pertinência das CDFs para a classe Normal, usando características extraídas dos segmentos de 1863 CDF reais da base de dados pré-classificada, e também de CDFs geradas artificialmente a partir de imagens da literatura (EICKMEIER, 1967; KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991; SCHNITMAN; ALBUQUERQUE; CORRÊA, 2003).

De cada CDF foram extraídos os 4 segmentos principais: cima, direita, baixo e esquerda, e as seguintes características:

- Ângulo médio
- *Negative Bending Energy (NBE)*
- *Positive Bending Energy (PBE)*

O ângulo médio,  $ang_{\mu}$  é calculado simplesmente extraído-se os ângulos entre os pares de pontos sequenciais de cada segmento, como na equação (15),  $d_n$  é o deslocamento de cada ponto da CDF,  $c_n$  é a carga e  $N$  é a quantidade de pontos.

$$ang_{\mu} = \frac{\sum_{n=2}^N atan2\sqrt{(d_n - d_{n-1})^2 - (c_n - c_{n-1})^2}}{N} \quad (15)$$

O *Bending Energy* foi apresentado no item 3.4, e indica a quantidade de torção representada por suas curvaturas, apresentadas em um segmento. O *Bending Energy* por vezes pode apresentar valores similares para segmentos com curvaturas visualmente diferentes, como um segmento com uma concavidade acentuada, e outro que tem uma concavidade menor e uma convexidade menor, como na Figura 4-17.

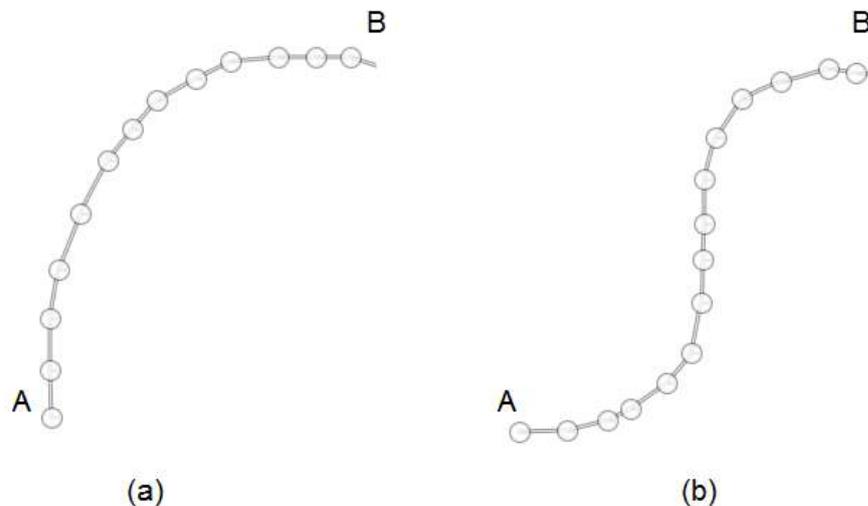


Figura 4-17: Exemplos de segmentos, a e b, com valores de *Bending Energy* Similares.

Assim, para distinguir melhor as curvaturas dos segmentos principais da CDF uma versão alternativa do *Bending Energy* esta sendo apresentada neste trabalho, calculando separadamente as curvaturas negativas (convexidade) e positivas (concavidade), gerando então o *Positive Bending Energy* e o *Negative Bending Energy*, o que permite identificar melhor convexidades e concavidades. Ambos são calculados a partir do vetor de ângulos entre os pares de pontos sequenciais de cada segmento. Primeiro calcula-se o vetor de diferenças entre ângulos na equação (16), e então se calcula o *Positive Bending Energy (PBE)* e o *Negative Bending Energy (NBE)* como nas equações (17) e (18), onde  $ang_n$  é o ângulo formado entre um ponto da CDF e o ponto anterior e N é a quantidade de pontos da CDF.

$$\Delta ang_n = ang_n - ang_{n-1} \quad \text{para } n > 1 \quad (16)$$

$$PBE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\Delta ang_n|^2 \quad \text{para } \Delta ang_n \geq 0 \quad (17)$$

$$NBE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\Delta ang_n|^2 \quad \text{para } \Delta ang_n < 0 \quad (18)$$

Para extrair estatísticas é importante eliminar os *outliers*, dados discrepantes da distribuição que se diferenciam significativamente das demais amostras. Normalmente são causados por influência de ruídos ou ainda de falhas ou inconsistências na classificação realizada por especialistas. Para fim de identificação dos *outliers* neste trabalho é utilizada a abordagem do intervalo interquartil (UPTON; COOK, 1996).

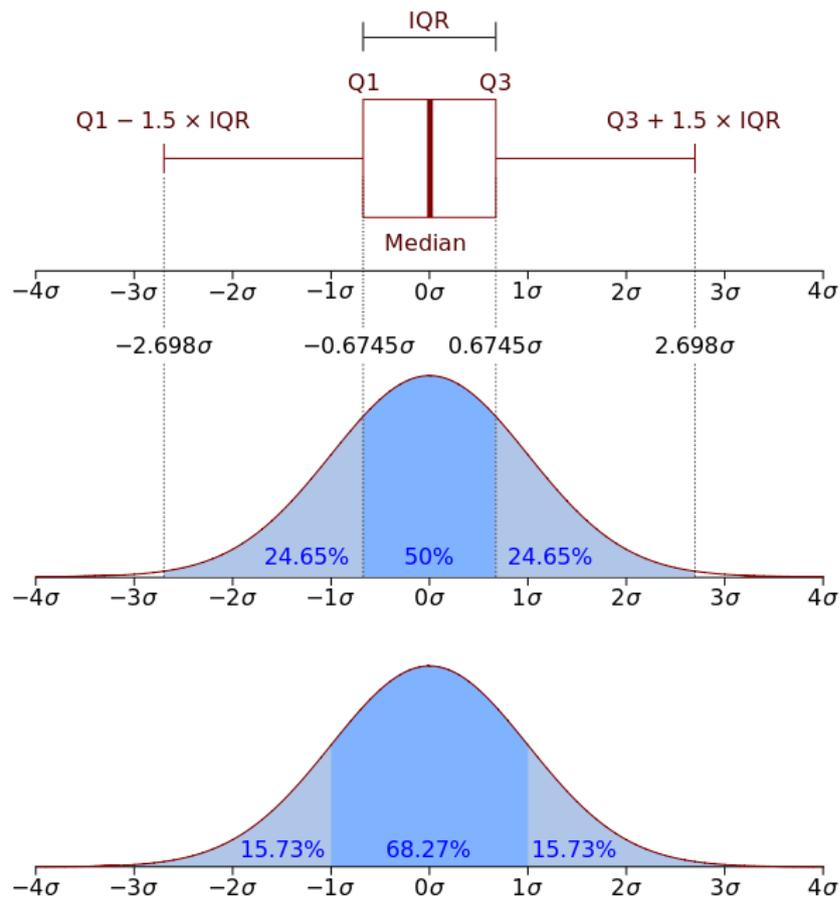


Figura 4-18: Comparação do intervalo interquartil e derivados sobre uma distribuição normal. Q2 é a mediana (*Median*). Fonte: Wikipedia.

O intervalo interquartil é uma medida de dispersão estatística, sendo igual à diferença entre os quartis superior e inferior. A partir do intervalo interquartil são calculados os *inner fences*, que são limites numéricos que determinam um intervalo de confiança onde não deve haver dados discrepantes. Também são determinados os *outer fences*, que são limites numéricos a partir dos quais são encontrados os valores extremos, ou *outliers fortes*. Os valores entre os *inner fences* e *outer fences* são considerados possíveis *outliers*, ou *outliers fracos*. O intervalo interquartil, ou IQR, é determinado encontrando-se os valores Q1, Q2 e Q3. Q2 é o valor da mediana dos dados, e dividindo-se os dados entre antes e depois de Q2 podemos calcular Q1 e Q3, que são respectivamente a mediana da metade inferior dos dados e a mediana da metade superior dos dados, também chamados de quartis superior e inferior dos dados. Assim o IQR é calculado como na equação (19). Na Figura 4-18 é demonstrado o intervalo interquartil sobre uma distribuição normal.

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (19)$$

A partir do IQR calculamos os *inner fences*, que são o *lower inner fence* e o *upper inner fence*, a partir das equações (20) e (21).

$$\text{lower inner fence} = Q1 - 1,5 * IQR \quad (20)$$

$$\text{upper inner fence} = Q3 + 1,5 * IQR \quad (21)$$

E os *outer fences*, *lower outer fence* e o *upper outer fence* são calculados como nas equações (22) e (23).

$$\text{lower outer fence} = Q1 - 3 * IQR \quad (22)$$

$$\text{upper outer fence} = Q3 + 3 * IQR \quad (23)$$

O intervalo interquartil é uma ferramenta usada para remoção dos *outliers*, e aqui a usamos também suas estatísticas para comparar as características dos segmentos das classes de CDF, e por fim inferir o grau de pertinência de Cartas às classes de condição de bombeio.

As estatísticas do intervalo interquartil são então geradas das características extraídas dos segmentos de todas as CDFs, reais e artificiais, da mesma classe.

Dos quatro segmentos de cada uma das CDFs:

- 1 - cima
- 2 - direita
- 3 - baixo
- 4 - esquerda

São extraídos 3 características:

- Ângulo médio
- *Negative Bending Energy (NBE)*
- *Positive Bending Energy (PBE)*

E então as estatísticas do intervalo interquartil são geradas:

- Lower inner fence
- Upper inner fence
- Lower outer fence
- Upper outer fence

As estatísticas geradas são usadas para modelar os sistemas *Fuzzy Mamdani* dos classificadores.

A lógica *Fuzzy*, ou lógica difusa, é uma forma de lógica que admite valores intermediários além dos simples falso e verdadeiro da lógica booleana, o que ajuda a refletir a forma humana de se relacionar com os dados em afirmações imprecisas como muito quente, morno, baixo ou médio (ISHIBUCHI; NOJIMA; KUWAJIMA, 2008).

No método *Fuzzy* é preciso fazer a fuzzificação dos dados, onde cada variável de entrada tem estados definidos, como baixo e alto, que são termos linguísticos, e cada termo precisa ser associado a um conjunto *Fuzzy* por uma função de pertinência.

As variáveis de entrada dos sistemas *Fuzzy* criados para os classificadores são 4 estatísticas extraídas de cada uma das 3 características extraídas de cada um dos 4 segmentos das CDF, totalizando 48 variáveis para o projeto de cada um dos classificadores *Fuzzy* aqui desenvolvidos para testes. Uma vez que os sistemas *Fuzzy* sejam usados será necessário apenas a entrada direta das 3 características extraídas dos 4 segmentos, totalizando 12 entradas.

Para as variáveis de ângulo médio dos segmentos foram definidos os termos linguísticos baixo, médio e alto. Por exemplo, as estatísticas extraídas do ângulo médio do segmento 1, também chamado de para cima, das Cartas da classe Normal foram as seguintes:

- *Lower outer fence*=58,74°
- *Lower inner fence*=74,12°
- *Upper inner fence*=79,24°
- *Upper outer fence*=94,62°

A partir dessas estatísticas é interpretado que uma CDF possivelmente é da classe Normal se tiver ângulo médio do segmento 1 entre 74,12 e 79,24 graus. Uma CDF que tenha ângulo médio desse segmento entre 58,74 e 74,12 ou entre 79,24 e 94,12 talvez seja da classe Normal. Uma CDF que tenha ângulo médio do segmento 1 abaixo de 58,74 ou acima de 94,62 provavelmente não é da classe Normal.

As funções de pertinência dos termos linguísticos das variáveis de ângulo médio são então definidas com base nas estatísticas geradas, utilizando funções trapezoidais, para todos os segmentos principais, em faixa de entrada entre 0 e 180 para os segmentos 1 e 3, e entre -90 e 90 para os segmentos 2 e 4. Importante notar que o cálculo dos ângulos dos segmentos 1 e 2 é feito na ordem original dos pontos na CDF, mas nos segmentos 3 e 4 é feito de forma invertida, e com isso se evita complicações de transição de valores entre -180 e 180 graus nos cálculos de ângulos.

Por exemplo, valores entre 74,12 e 79,24, valores de *inner fence*, são considerados com pertinência de 1 (100%) para o termo médio, enquanto valores fora de faixa decaem de pertinência em linha reta até o limites de *outer fence*. Os mesmo valores são usados nos termos baixo e alto, mas de forma inversa, decaindo de pertinência retilineamente a partir dos valores de *outer fence* até os valores de *inner fence*. Essa abordagem resolve simultaneamente o problema de definição das funções de pertinência, exclui totalmente *outliers* fortes e reduz gradativamente a pertinência dos *ouliers* fracos. Na Figura 4-19 são exibidas as funções de pertinência dos termos linguísticos para o ângulo médio do segmento 1.

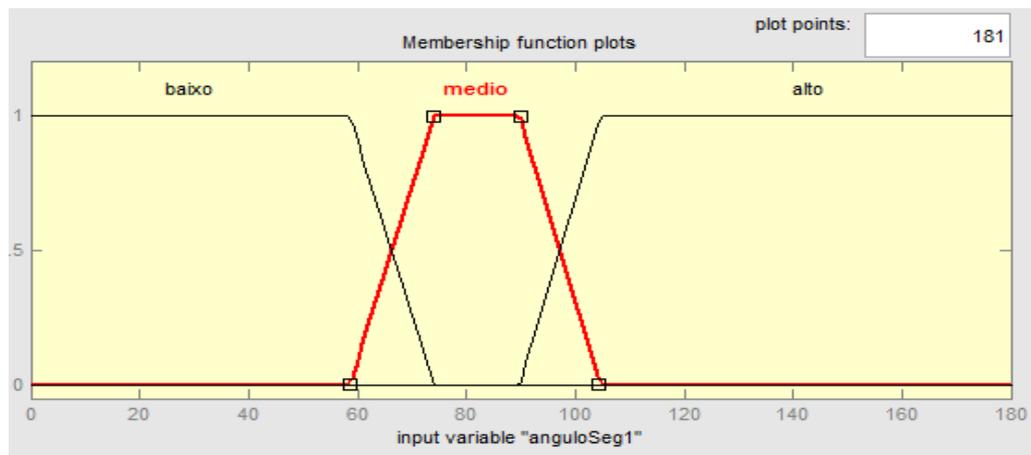


Figura 4-19: Variável de entrada do ângulo médio do segmento 1 e as funções de pertinência de cada termo linguístico.

Para as variáveis de entrada *PBE* e *NBE* do sistema *Fuzzy*, foram definidos dois termos linguísticos, baixo e alto. A faixa de variação de *PBE* e *NBE* foi definida entre 0 a 40000, baseando-se nos valores máximos e mínimos encontrados. Foram geradas funções de pertinência de forma semelhante ao demonstrado acima através das estatísticas calculadas. Na Figura 4-20 são exibidas as funções de pertinência dos termos linguísticos da variável de entrada de *NBE* para o segmento 2.

A saída do sistema *Fuzzy* criado infere o grau de normalidade da CDF sendo processada, então foram definidos dois termos linguísticos para a saída, normal e anormal, em uma faixa variando de 0 a 1, ou seja, 0% de normalidade a 100% de normalidade. A função de pertinência triangular foi definida para ambos os termos conforme exibida na Figura 4-21.

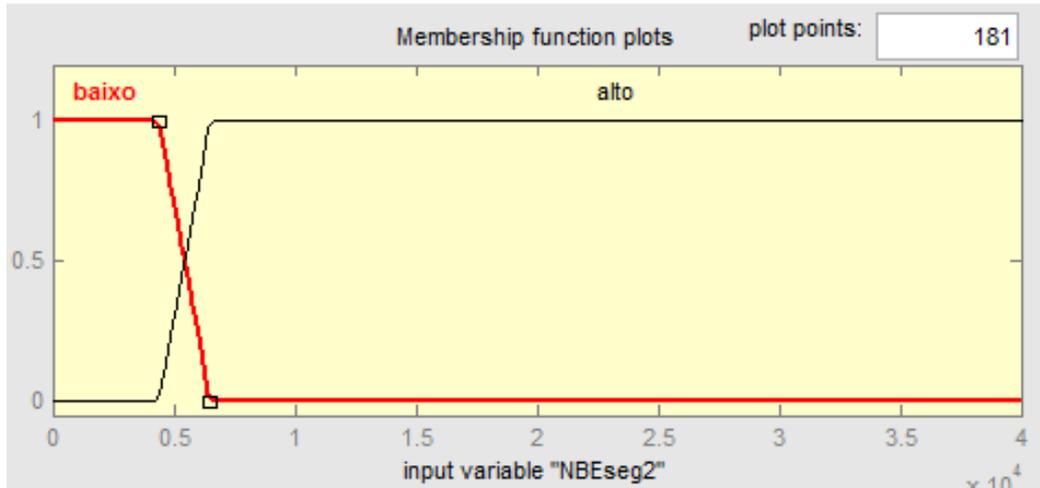


Figura 4-20: Variável de entrada do *Negative Bending Energy* do segmento 2 e as funções de pertinência de cada termo linguístico

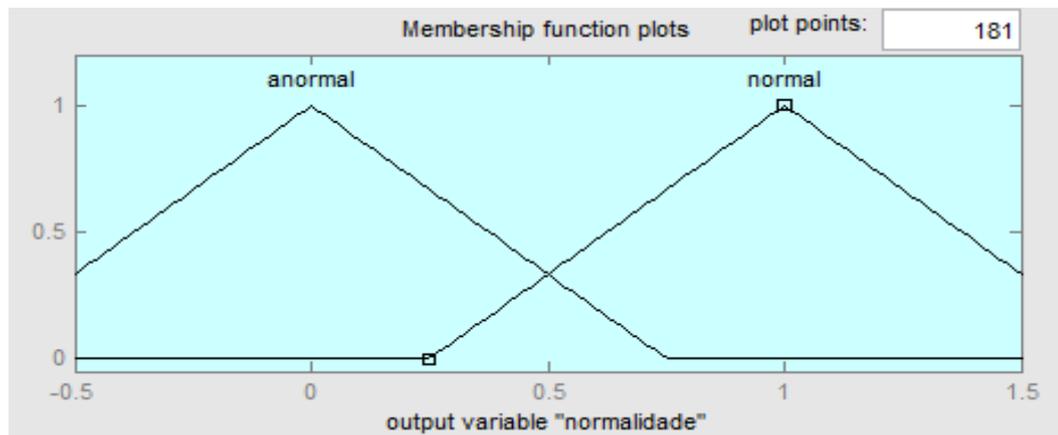


Figura 4-21: Variável de saída do sistema *Fuzzy* de análise de normalidade e as funções triangulares de pertinência dos dois termos linguísticos usados, anormal e normal.

Com a definição de entrada e saída do sistema *Fuzzy*, foram definidas as regras de inferência. Basicamente foi definido que a saída será normal caso todas as variáveis de entrada de ângulo médio sejam médias, e caso todas as variáveis de *Bending Energy* sejam baixas. Por outro lado, se qualquer variável de entrada de ângulo médio não for média ou qualquer variável de *Bending Energy* não for baixa, a saída será anormal. Abaixo temos as regras usadas em linguagem simbólica:

1. (anguloSeg1==médio) & (anguloSeg2==médio) & (anguloSeg3==médio) &  
(anguloSeg4==médio) & (NBEseg1==baixo) & (NBEseg2==baixo) &  
(NBEseg3==baixo) & (NBEseg4==baixo) & (PBEseg1==baixo) &

$(PBEseg2==baixo) \ \& \ (PBEseg3==baixo) \ \& \ (PBEseg4==baixo) \ \Rightarrow$   
 $(normalidade=normal) \ (1)$

2.  $(anguloSeg1\sim=m\u00e9dio) \ | \ (anguloSeg2\sim=m\u00e9dio) \ | \ (anguloSeg3\sim=m\u00e9dio) \ |$   
 $(anguloSeg4\sim=m\u00e9dio) \ | \ (NBEseg1\sim=baixo) \ | \ (NBEseg2\sim=baixo) \ |$   
 $(NBEseg3\sim=baixo) \ | \ (NBEseg4\sim=baixo) \ | \ (PBEseg1\sim=baixo) \ |$   
 $(PBEseg2\sim=baixo) \ | \ (PBEseg3\sim=baixo) \ | \ (PBEseg4\sim=baixo) \ \Rightarrow$   
 $(normalidade=anormal) \ (1)$

A Figura 4-22 apresenta um fluxograma do processo de an\u00e1lise de normalidade descrito.

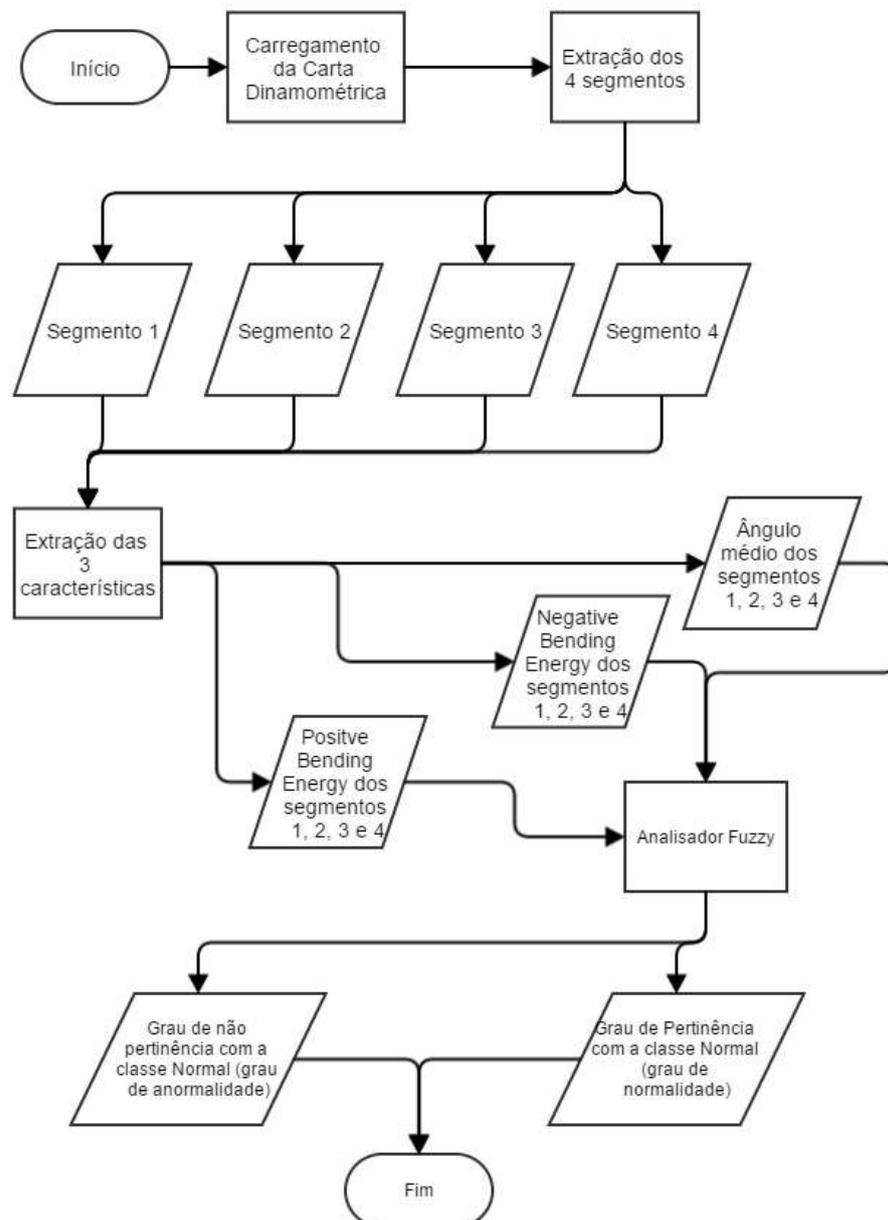


Figura 4-22: Fluxograma do processo de an\u00e1lise de normalidade das CDF.

Todas as 1863 amostras de CDF pré-classificadas como Normal da base de dados utilizada foram testadas por este sistema *Fuzzy*. Destas, 278 tiveram resultado de inferência abaixo de 0,5, o que indica que não foram consideradas CDFs da classe Normal, apesar de estarem pré-classificadas assim. Com 278 CDFs classificadas como não Normal o classificador poderia ser avaliado como tendo um índice de acerto de 85,07%, no entanto as 278 CDF foram então examinadas individualmente de acordo com a análise das classes de condição de bombeio nas CDFs, e é possível afirmar que estas, de fato, não deveriam ser consideradas da classe Normal, o que indica que o classificador teve um índice de acerto de 100%.

Na Figura 4-23 são exibidas algumas das CDFs pré-classificadas como Normal na base de dados, mas que foram consideradas anormais no sistema *Fuzzy* criado. Sendo o problema de análise do Sistema de Bombeio Mecânico através das CDFs um processo de conhecimento especialista, é compreensível que especialistas diferentes tenham opiniões diferentes sobre a mesma CDF ou até que o mesmo especialista tenha opiniões diferentes se forem apresentadas as mesmas CDFs em momentos diferentes. Além disso, não há uma definição canônica da quantidade de distorções aceitável na forma de uma CDF para que ela seja considerada Normal, e cada especialista deve ter sua própria ideia desse limite, então um classificador baseado nas análises de diversos especialistas pode representar uma média dos limites de tolerância destes. Assim é compreensível que haja inconsistências nas classificações de CDFs reais por especialistas humanos, e também é importante que essas inconsistências sejam devidamente eliminadas.

Os resultados dos testes demonstram que o sistema *Fuzzy* com as estatísticas extraídas é capaz de replicar então o raciocínio humano geral aplicado na classificação manual, representando uma média da análise das CDFs realizada pelos especialistas para classificação das mesmas, portanto eliminando as inconsistências entre elas, oferecendo robustez e ainda a interpretação dos segmentos das CDFs.

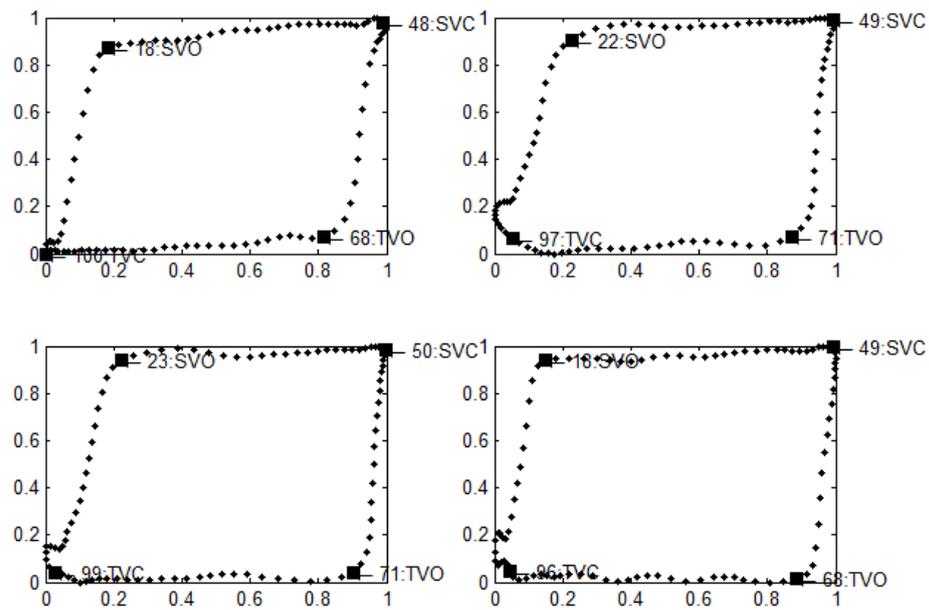


Figura 4-23: CDF da base de dados pré-classificadas como Normal e que tiveram saída abaixo de 0,5 no sistema *Fuzzy* criado, portanto consideradas anormais.

Além do teste das CDFs da classe Normal da base de dados de Cartas reais, todas as outras CDFs da mesma base foram testadas, de classes diferentes, portanto anormais, e a quantidade de CDF consideradas normais é apresentada abaixo:

- 0 das 4120 CDF da classe Pancada de Fluido
- 12 das 48 CDF da classe Batida na Parte Superior
- 0 das 17 CDF da classe Interferência de Gás
- 0 das 84 CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio

Como pode ser observado, de todas as CDFs de poços reais testadas, de condições de bombeio anômalas, apenas algumas CDFs da classe Batida na Parte Superior foram consideradas normais pelo classificador *Fuzzy* criado. Estas foram analisadas individualmente e comparadas com CDF consideradas no limite de normalidade, sendo uma delas exibida na Figura 4-24. É possível concluir que apesar das mesmas também terem distorções que sugerem alguma anormalidade, talvez elas nem sejam realmente da classe Batida na Parte Superior, conforme a mesma é definida. Por outro lado é importante considerar que anomalias como a da classe Batida na Parte Superior são reconhecidas por subsegmentos dos segmentos principais muitas vezes muito menores que o segmento principal, portanto a influência destes pode não ser suficiente para alterar as estatísticas gerais dos segmentos da qual fazem parte.

Assim o reconhecimento dessas anomalias de subsegmentos deve ser esperado apenas nos seus classificadores especializados como os que serão à seguir.

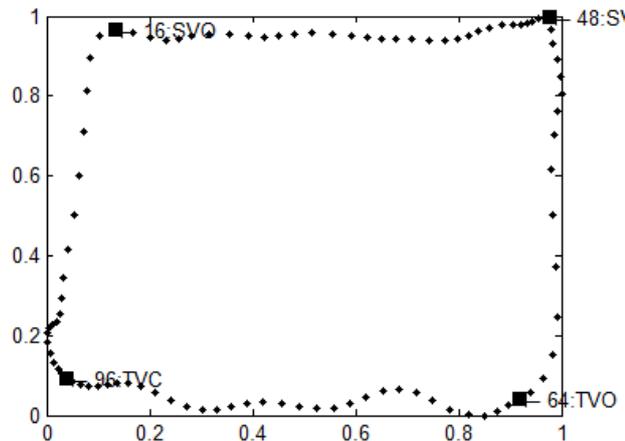


Figura 4-24: CDF pré-classificada em base de dados como sendo da classe Batida na Parte Superior, portanto anormal, mas que foi considerada da classe Normal pelo sistema *Fuzzy* criado.

Também devido à base de dados não oferecer CDF de outras condições de bombeio além das apresentadas, CDF artificiais geradas a partir da literatura foram utilizadas para testes, de todas as condições de bombeio estudadas. As CDFs artificiais de condições de bombeio anômalas foram corretamente avaliadas como anormais pelo sistema *Fuzzy*, e as CDFs artificiais da classe Normal foram consideradas normais.

Os resultados de avaliação de normalidade do sistema *Fuzzy*, quando observados de forma binária, ou seja, apenas pela saída ser considerada normal ou anormal, demonstraram grande potencial. Além disso, os resultados do sistema *Fuzzy* servem para quantificar o grau de normalidade de qualquer CDF, e mesmo que a Carta não tenha uma anomalia específica reconhecida por outros classificadores, uma medida de normalidade limítrofe pode ser usada como predição de anomalia e sugerir uma análise por um especialista humano. Assim, os resultados de todos os sistemas *Fuzzy* que serão apresentados mais adiante para analisar anomalias podem ser usados também para quantificar as mesmas, portanto inferir sua severidade.

Caso testes CDF de formas não previstas não tenham sucesso no futuro, ou que se busque aperfeiçoar a saída dos resultados de forma a refletir melhor a gradação entre anormalidade e normalidade, é possível ajustar as funções de pertinência a partir dos valores das características de CDF artificiais geradas por especialistas. Por exemplo, observadas as amostras de CDF reais da classe Normal usadas constata-se que não há amostras próximas das CDFs ideal, portanto pode se afirmar que as estatísticas de ângulo médio extraídas não

inferem normalidade de 100% para CDF da classe Normal que tenham poços ancorados, ou seja, que tenham ângulo médio de 90 graus nos segmentos 1 e 3. Assim, as funções de inferência de ângulo médio podem ser manualmente ajustadas por essas considerações, aumentando a consistência e robustez dos resultados do sistema.

#### 4.2.2 Analisadores de anomalias através de características dos segmentos principais da CDF

Através de características dos segmentos principais, usando a mesma abordagem usada para criar o sistema *Fuzzy* para analisar o grau normalidade acima demonstrado, foram criados sistemas de inferência *Fuzzy* especialistas para as seguintes anomalias:

- Interferência de Gás
- Vazamento na Válvula de Pé
- Vazamento na Válvula de Passeio
- Fricção

Conforme já relatado, a saída dos sistemas fuzzy é usada para quantificar a severidade das anomalias sendo analisadas.

##### 4.2.2.1 Interferência de Gás

A quantidade de CDF da classe Interferência de Gás disponível na base de dados utilizada é muito menor do que da classe Normal, portanto é ainda mais importante considerar as características de CDF da literatura. Um sistema *Fuzzy* de análise de Interferência de Gás foi criado usando CDFs reais e artificiais, pois com apenas 17 CDF reais as 3 artificiais usadas podem ser significantes nas estatísticas, e os valores mínimo e máximo das características, além dos *inner fence* e *outer fence*, também foram considerados.

Assim o analisador *Fuzzy* de Interferência de Gás foi usado para testar CDF reais da base de dados, e 16 das 17 CDFs da classe Interferência de Gás foram inferidas como tal.

Abaixo vemos a quantidade de CDF da biblioteca de Cartas reais inferidas como sendo da classe Interferência de Gás, ou seja, com saída de inferência acima de 0,5:

- 16 de 17 das CDFs da classe Interferência de Gás.
- 0 de 1863 das CDFs da classe Normal.
- 313 de 4120 das CDFs da classe Pancada de Fluido.
- 0 de 48 das CDFs da classe Batida na Parte Superior.
- 0 de 84 das CDFs da classe Vazamento na Válvula de Passeio.

Como relatado, uma CDF pré-classificada como Interferência de Gás não foi inferida dessa forma, e quando analisada visualmente podemos perceber que deve haver a anomalia Ancoragem Deficiente ao analisar o segmento 1 como exibida na Figura 4-25, e o ângulo médio dos segmentos 1 e 3 parece estar no limite da normalidade quando consideramos as Cartas da classe Normal com ancoragem.

313 CDFs de Pancada de Fluido foram inferidas como tendo Interferência de Gás, de um total de 4120. Observadas individualmente, nota-se que o ângulo médio dos segmentos 1 e 3 delas fica no limite da inferência para Interferência de Gás ou para Normal com ancoragem, como na Figura 4-26. Talvez estas CDFs sejam tanto de Pancada de Fluido como Interferência de Gás, e em trabalhos futuros uma revisão por especialistas a partir da análise de segmentos proposta por este trabalho pode permitir que os limites das características dos segmentos sejam revistos, oferecendo maior confiabilidade nos resultados.

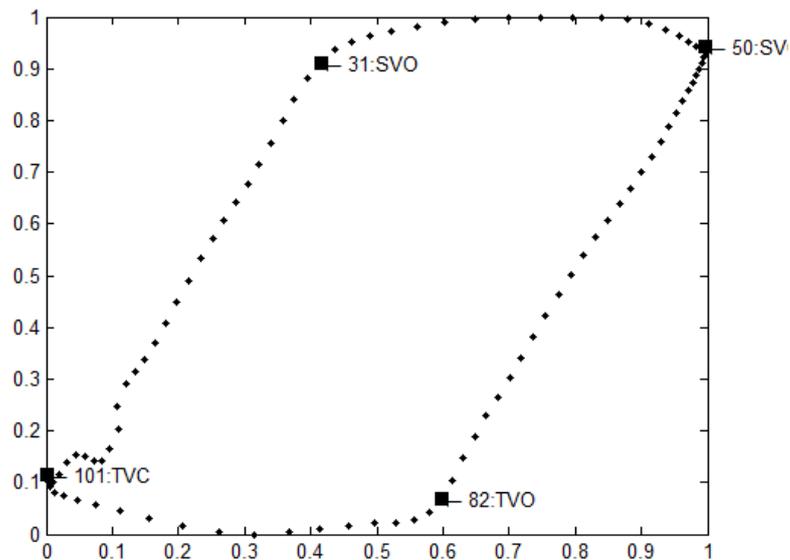


Figura 4-25: CDF pré-classificada na classe Interferência de Gás, mas que teve saída menor 0,5 no sistema de *Fuzzy* criado para inferir Interferência de Gás. A mesma apresenta anomalia no segmento 1 que indica também Ancoragem Deficiente.

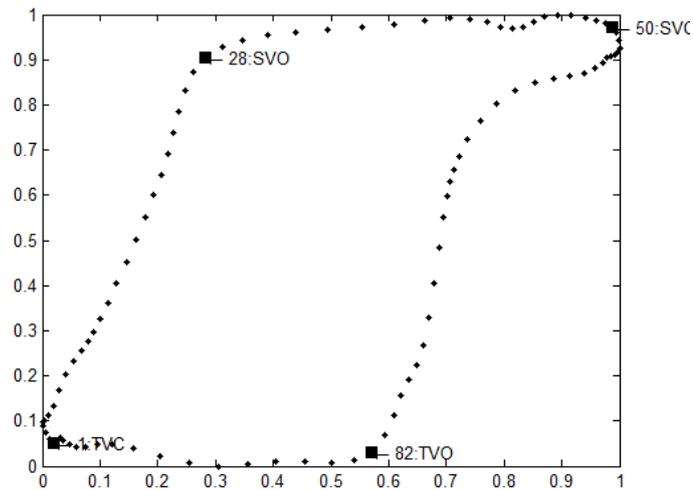


Figura 4-26: CDF pré-classificada na classe Pancada de Fluido, mas que teve saída maior que 0,5 no sistema de *Fuzzy* criado para inferir Interferência de Gás. O ângulo médio dos segmentos 1 e 3 parecem estar no limite de reconhecimento entre Normal e Interferência de Gás. Talvez a mesma seja de Pancada de Fluido e Interferência de Gás.

#### 4.2.2.2 Vazamento na Válvula de Passeio

Outro sistema *Fuzzy* foi criado para analisar o Vazamento na Válvula de Passeio nas CDFs. Neste caso apenas o ângulo médio dos segmentos 1 e 3 foi usado para o diagnóstico, devido à definição da anomalia em si.

O analisador *Fuzzy* de Vazamento na Válvula de Passeio foi usado para testar as CDF reais da base de dados, e 82 das 84 CDFs da classe Vazamento na Válvula de Passeio foram assim inferidas.

Abaixo vemos a quantidade de CDF da biblioteca de Cartas reais inferidas como sendo da classe Vazamento na Válvula de Passeio, ou seja, com saída de inferência acima de 0,5:

- 82 de 84 das CDFs da classe Vazamento na Válvula de Passeio.
- 0 de 17 das CDFs da classe Interferência de Gás.
- 0 de 1863 das CDFs da classe Normal.
- 0 de 4120 das CDFs da classe Pancada de Fluido.
- 0 de 48 das CDFs da classe Batida na Parte Superior.

Apenas duas CDFs pré-classificadas como Vazamento da Válvula de Passeio não foram inferidas como tal no sistema. Analisadas as CFS individualmente percebe-se que o problema parece estar na superposição de anomalias que alteram a média final de ângulo dos segmentos de interesse, colocando as CDFs apenas perto do limite de inferência. Na Figura

4-27 podemos ver uma CDF que parece apresentar Ancoragem Deficiente e Vazamento na Válvula de Passeio.

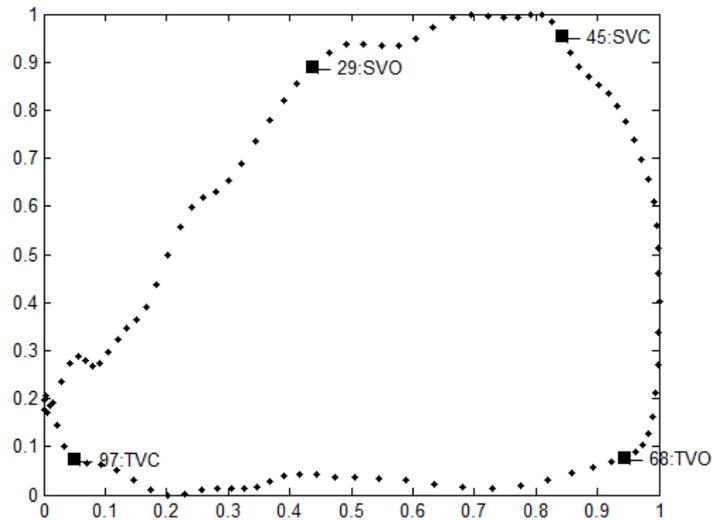


Figura 4-27: Uma das duas CDF pré-classificadas como de Vazamento na Válvula de Passeio que apresenta deformidade compatível também com Ancoragem Deficiente e que foi considerada com pertinência abaixo de 0,5 pelo classificador desenvolvido.

#### 4.2.2.3 Vazamento na Válvula de Pé

Um sistema *Fuzzy* foi criado para analisar o Vazamento na Válvula de Pé nas CDFs usando somente características de CDFs artificiais como a da Figura 4-28, pois não havia amostras reais na biblioteca usada. As CDFs artificiais foram geradas a partir de figuras similares de CDFs da classe Vazamento na Válvula de Pé encontradas em publicações diversas (BEZERRA; SCHNITMAN; FILHO, 2009; KEATING; LAINE; JENNINGS, 1991; SCHNITMAN; ALBUQUERQUE; CORRÊA, 2003). No caso apenas o ângulo médio dos segmentos 1 e 3 foi usado para o diagnóstico, devido à definição da anomalia em si.

Todas as CDFs artificiais de Vazamento na Válvula de Pé foram corretamente inferidas no teste realizado.

Corretamente nenhuma das CDFs de poços reais e artificiais de outras classes foi inferida como tendo Vazamento na Válvula de Pé.

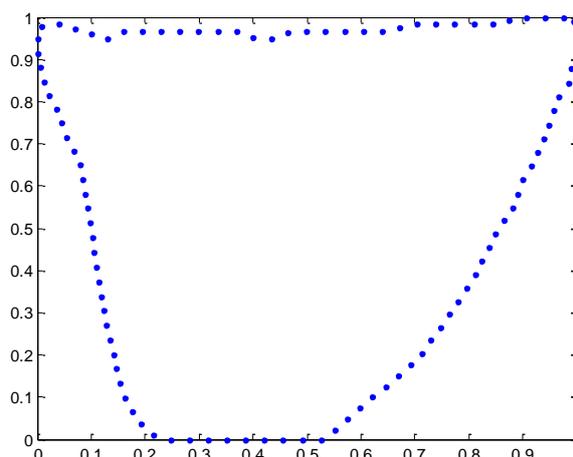


Figura 4-28: CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio gerada artificialmente.

#### 4.2.2.4 Fricção

O classificador de Fricção criado usou características de apenas uma CDF artificial da classe, pois a literatura não apresenta maiores variações para a mesma. No caso da Fricção, fica claro que o problema se apresenta como um desenvolvimento menos estável dos segmentos, apresentando uma forma geral mais convexa. Assim, basicamente a classe pode ser reconhecida em relação às outras classes pela presença de maior quantidade de *Negative Bending Energy* (NBE) nos segmentos e uma menor quantidade de *Positive Bending Energy* (PBE). A inversão de energia se deve a inversão de sentido aplicada aos segmentos 3 e 4 para facilitar os cálculos conforme explicado anteriormente (Figura 4-29).

Os testes realizados com este analisador corretamente não identificaram nenhuma inferência de Fricção nas CDFs da base de dados de Cartas de poços reais.

Não há referência a severidades diferentes da anomalia na literatura, mas baseado no entendimento da anomalia a quantidade de NBE pode ser para quantificar a severidade da mesma, o que é feito pelo sistema *Fuzzy* criado.

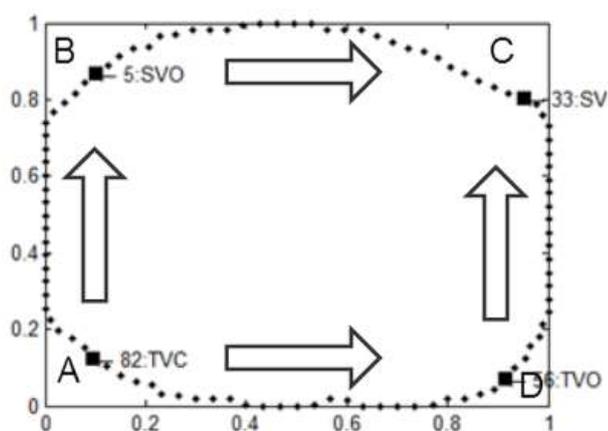


Figura 4-29: CDF artificial da classe Fricção com pontos de abertura e fechamento de válvulas identificados e sentido de cálculo das diferenças angulares indicado.

### 4.2.3 Classificadores baseados em subsegmentos dos segmentos principais das CDFs

Conforme análise compreensiva das classes de condições de bombeio, as seguintes classes são definidas por características de subsegmentos específicos nos segmentos principais:

- Ancoragem Deficiente
- Pancada de Fluido
- Batida na Parte Superior da Bomba
- Batida na Parte Inferior da Bomba
- Camisa Abaulada
- Camisa Desgastada

#### 4.2.3.1 Ancoragem Deficiente

Essencialmente a Ancoragem Deficiente é reconhecida pela existência de um subsegmento de queda da carga no segmento 1, e um subsegmento de subida da carga no segmento 3. Um algoritmo específico foi criado para identificar a existência dos subsegmentos em questão, usando a abordagem *Chain Code* de forma similar a usada para extrair os segmentos principais.

Na base de dados de CDF reais não há nenhuma CDF pré-classificada como de Ancoragem Deficiente, mas testes foram realizados sobre todas as CDFs e algumas CDFs reais de classes diferentes foram identificadas como tendo Ancoragem Deficiente. Todas as CDFs identificadas foram examinadas individualmente e apresentaram a distorção investigada

no segmento 1, mas não no segmento 3 (Figura 4-30, Figura 4-31, Figura 4-32). Talvez a distorção apenas no segmento 1 seja outra coisa que não Ancoragem Deficiente, mas de qualquer forma ela foi identificada e especialistas podem determinar se o algoritmo precisa ser ajustado para só identificar caso haja as distorções esperadas nos dois segmentos simultaneamente.

Na literatura não há referência a severidades diferentes para a anomalia, no entanto baseado no entendimento da mesma o comprimento do subsegmento para baixo dentro do segmento 1 é usado aqui para indicar a severidade da anomalia.

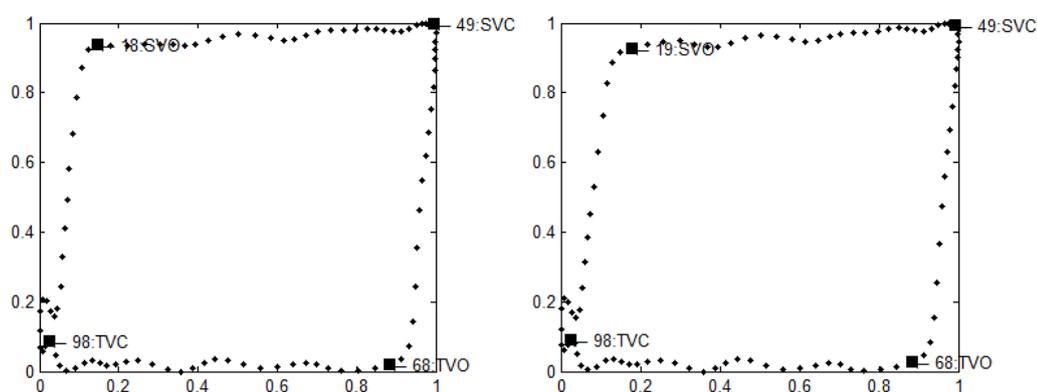


Figura 4-30: CDF da classe Normal identificadas com Ancoragem Deficiente.

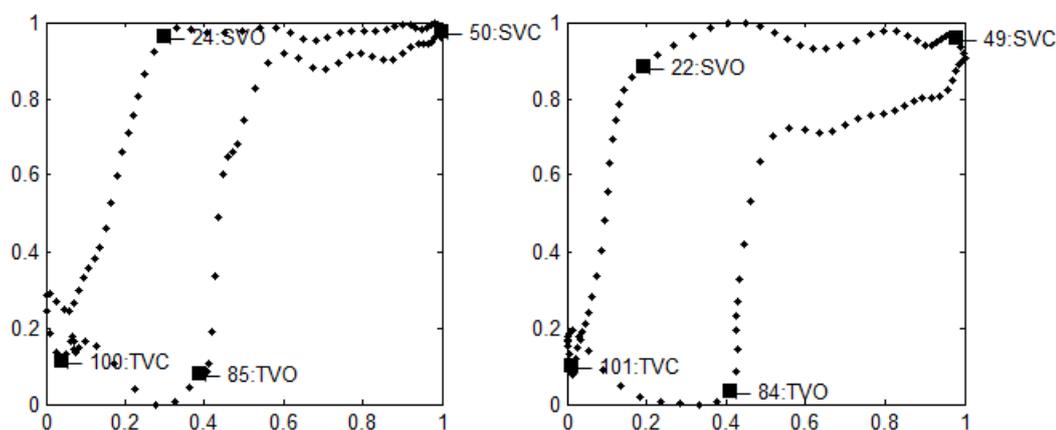


Figura 4-31: CDF da classe Pancada de Fluido identificadas com Ancoragem Deficiente.

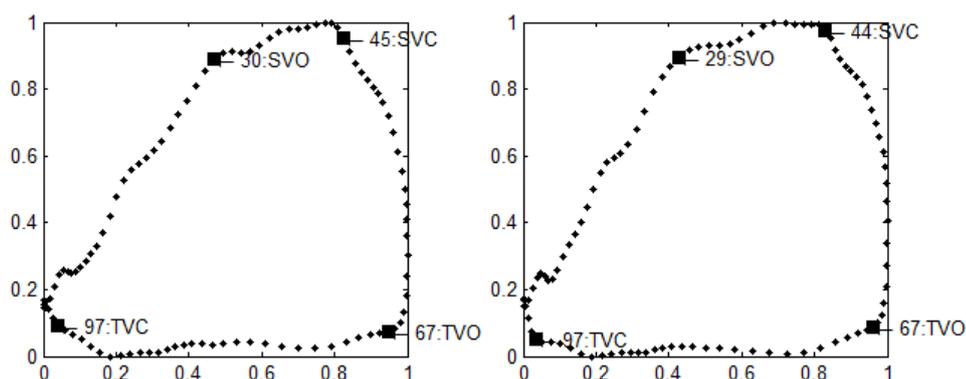


Figura 4-32: CDF da classe Vazamento na Válvula de Passeio identificadas com Ancoragem Deficiente.

#### 4.2.3.2 Pancada de Fluido

Para identificar as CDFs de Pancada de Fluido, conforme a definição da mesma, foi criado um algoritmo que busca por um subsegmento para a esquerda seguido de um grande subsegmento para baixo dentro do segmento 3. Além disso, este subsegmento para baixo dentro do segmento 3 precisa ter uma altura maior que a metade do segmento 3 e ainda ter média angular acima de 75,86 graus que é o limite de identificação de Interferência de Gás usado para este segmento.

O algoritmo foi testado nas CDFs reais e artificiais, e nenhuma CDF foi incorretamente inferida como de Pancada de Fluido. Por outro lado duas CDFs foram identificadas como não tendo Pancada de Fluido entre as CDFs pré-classificadas como tal. As mesmas podem ser vistas na Figura 4-33 e é possível afirmar que ambas dificilmente poderiam ser classificadas visualmente como Pancada de Fluido de acordo com a definição da anomalia.

Conforme analisado pelas referências de severidade da anomalia, a posição do subsegmento para baixo dentro do segmento 3 é usada aqui para indicar a severidade da anomalia.

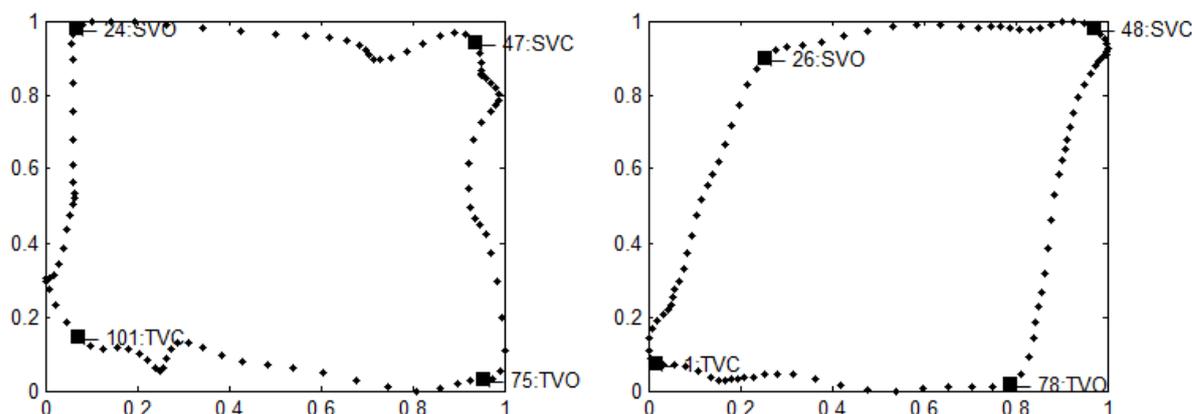


Figura 4-33: CDF pré-classificadas como Pancada de Fluido, mas que não foram inferidas como tal pelo algoritmo criado e apresentam formas incompatíveis com a descrição da anomalia.

#### 4.2.3.3 Batida na Parte Superior da Bomba

A CDF da classe Batida na Parte Superior pode ser identificada por um subsegmento de subida de carga no fim do segmento 2. Assim um algoritmo foi criado para identificar a existência desse subsegmento. Testes realizados sobre as CDFs reais pré-classificadas como Batida na Parte Superior resultaram em apenas uma delas identificadas como tal.

Importante lembrar que uma subida de carga é um segmento em que a variação de carga é maior que a variação de deslocamento, portanto um segmento com ângulo acima de 45 graus. Na Figura 4-34-a temos a única CDF pré-classificada como Batida na Parte Superior e que foi identificada com uma subida de carga no fim do segmento 2, e podemos comparar a mesma com as demais CDFs da Figura 4-34 que não tem o segmento.

Segundo a literatura e seus exemplos gráficos consultados, uma Batida na Parte Superior tem um segmento de subida bem definido como o que foi buscado pelo algoritmo, no entanto não é o que ocorre na maioria das CDFs pré-classificadas da base de dados disponível. Talvez especialistas na área considerem o ângulo médio da segunda metade do segmento 2 para fazer a identificação, o que também pode ser facilmente usado para ajustar o algoritmo aqui desenvolvido, mas a princípio a análise atual do classificador é a correta e os resultados foram precisos.

As demais CDFs da base de dados também foram testadas e corretamente nenhuma outra foi identificada como de Batida na Parte Superior.

Na literatura não há referência a severidades diferentes para a anomalia, no entanto baseado no entendimento da anomalia o comprimento do subsegmento para cima é usado para quantificar a severidade.

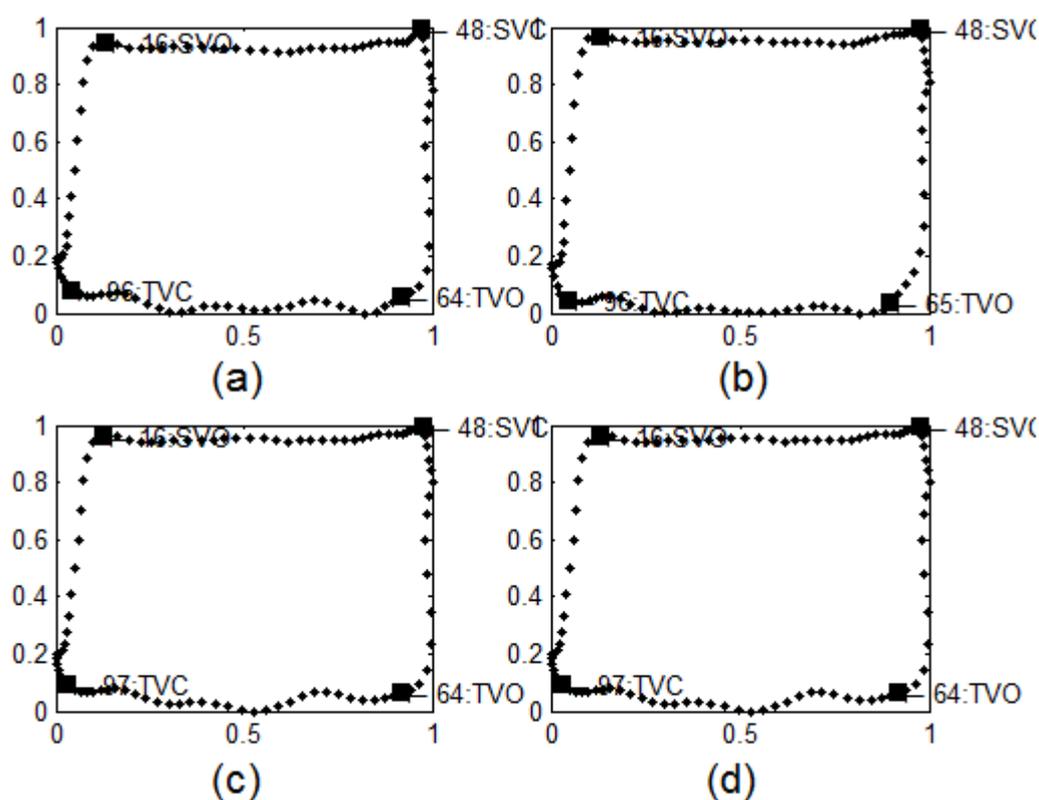


Figura 4-34: CDF da base de dados pré-classificadas como de Batidas na Parte Superior, mas apenas a CDF (a) tem efetivamente uma subida de carga no fim do segmento 2, a outras não.

#### 4.2.3.4 Batida na Parte Inferior da Bomba

CDF da classe Batida na Parte Inferior pode ser identificada por um subsegmento de descida de carga no fim do segmento 4, ou seja conectado ao ponto A, o fechamento da Válvula de Passeio. Assim um algoritmo foi criado para identificar a existência desse subsegmento.

Nenhuma CDF pré-classificada como Batida na Parte Inferior existia na base de dados de Cartas de poços reais, assim os testes foram aplicados às CDFs das outras classes. 3 CDFs da classe Normal da biblioteca de cartas de poços reais classificadas por especialistas foram identificadas com Batida na Parte Inferior. Estas foram examinadas individualmente e todas apresentaram o segmento de descida de carga no fim do segmento 4, como a CDF da Figura 4-35, portanto têm a anomalia de Batida na Parte Inferior da Bomba e não deveriam ter sido classificadas como da classe Normal. Também 1117 CDFs da classe Pancada de Fluido da base de cartas de poços reais foram identificadas com Batida na Parte Inferior, e examinadas individualmente elas realmente apresentam queda de carga no fim do segmento 4,

como podemos ver em alguns exemplos na Figura 4-36, portanto são CDFs com duas anomalias e então de duas classes. A análise individual das Cartas indica que todas as inferências foram corretas.

Na literatura não há referência a severidades diferentes para a anomalia, no entanto baseado no entendimento da anomalia o comprimento do subsegmento para baixo pode ser usado no algoritmo de análise para inferir a severidade.

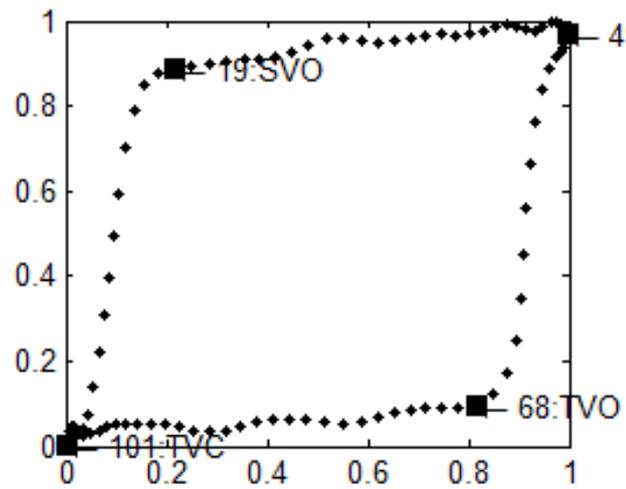


Figura 4-35: CDF pré-classificada como Normal e identificada com Batida na Parte Inferior.

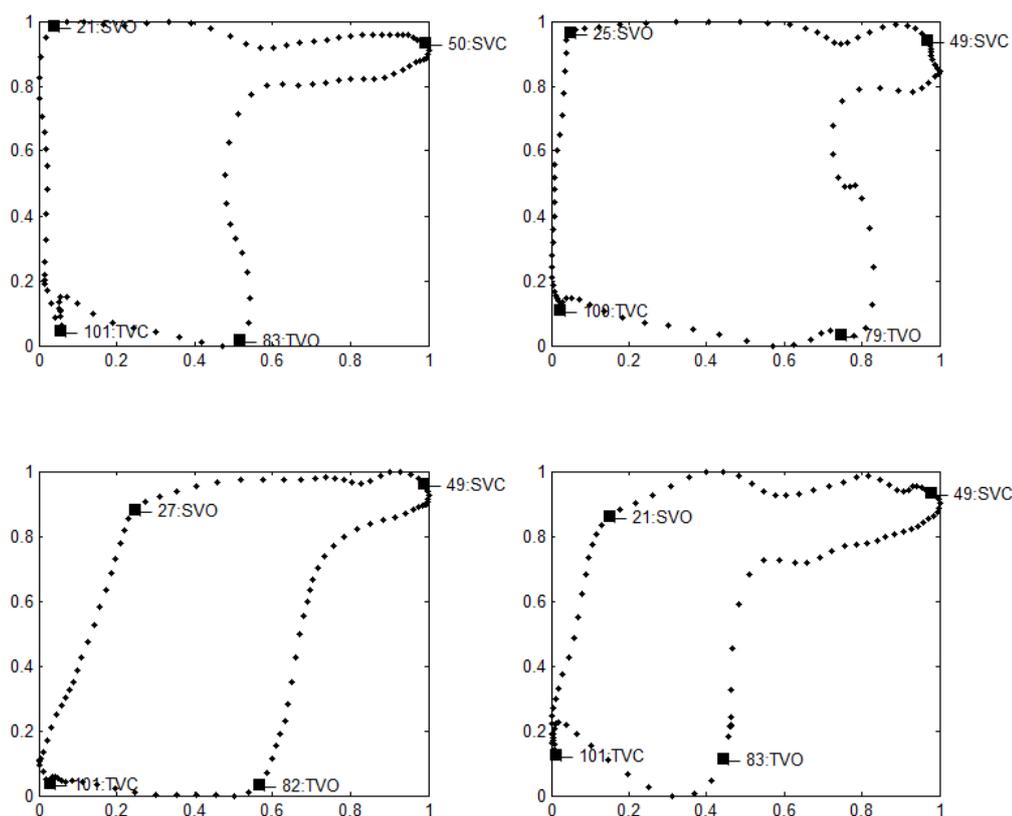


Figura 4-36: CDF pré-classificadas como Pancada de Fluido e que foram identificadas com Batida na Parte Inferior.

#### 4.2.3.5 Camisa Abaulada

A Camisa Abaulada pode ser identificada por um subsegmento convexo após um subsegmento para a direita seguido de outro subsegmento para a direita no segmento 2, e o inverso no segmento 4. Um algoritmo foi criado baseado nas CDFs artificiais de referência, para identificar o maior subsegmento com diferença angular sequencial negativa no segmento 2 e positiva no 4 (devido a inversão de análise angular previamente comentada), e ainda verificar a estabilidade de carga dos subsegmentos anterior e posterior usando as estatísticas de normalidade para o segmento principal. Quando os subsegmentos são reconhecidos, a quantidade de PBE e NBE destes é usada para quantificar a severidade do problema em um sistema *Fuzzy* segundo a definição da anomalia, apesar de na literatura não haver referência a severidades diferentes para a mesma.

O algoritmo identificou corretamente as CDFs artificiais da classe Camisa Abaulada como a CDF da Figura 4-37, e nenhuma CDF real da base de dados foi identificada com a anomalia. Os resultados indicam que esse analisador será capaz de identificar corretamente uma CDF de poço real que tenha a anomalia Camisa Abaulada.

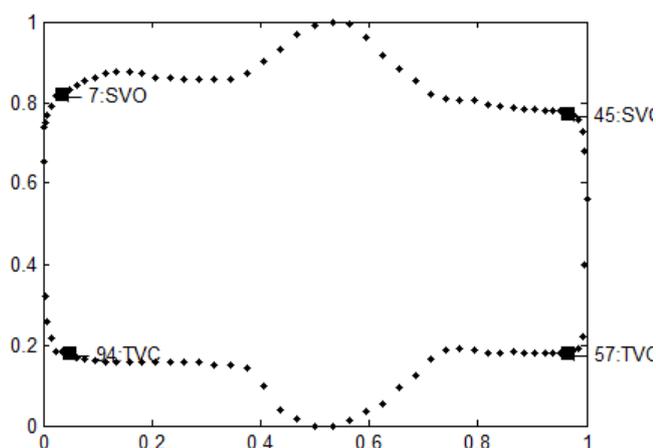


Figura 4-37: CDF Artificial da classe Camisa Abaulada.

#### 4.2.3.6 Camisa Desgastada

A Camisa Desgastada pode ser identificada por um subsegmento côncavo após um subsegmento para a direita e seguido de outro subsegmento para a direita no segmento 2. Um algoritmo foi criado baseado nas CDFs artificiais de referência, para identificar o maior subsegmento com diferença angular sequencial positiva no segmento 2, e ainda verificar a estabilidade dos ângulos dos subsegmentos anterior e posterior usando as estatísticas de normalidade para o segmento principal. Quando os subsegmentos são reconhecidos a quantidade de PBE e NBE do subsegmento côncavo é usada para quantificar a severidade do problema em um sistema *Fuzzy* segundo a definição da anomalia, apesar de na literatura não haver referência a severidades diferentes para a mesma.

O algoritmo identificou corretamente as CDFs artificiais da classe Camisa Desgastada como a CDF da Figura 4-38, e nenhuma CDF real da base de dados foi identificada com a anomalia.

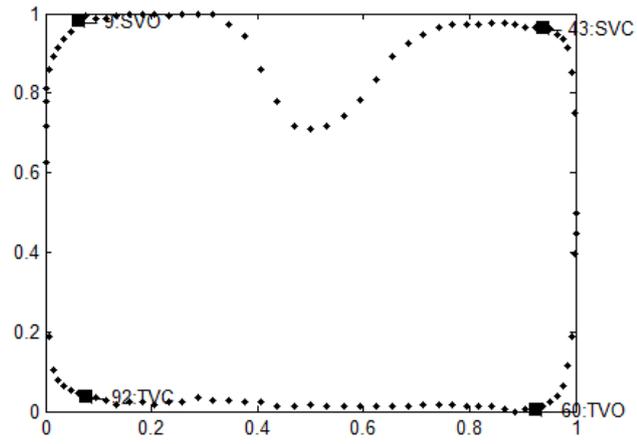


Figura 4-38: CDF artificial da classe Camisa Desgastada.

## 5 Conclusão

Este trabalho apresenta uma nova abordagem de análise da forma das Cartas Dinamométricas para suporte ao diagnóstico do Sistema de Bombeio Mecânico, baseada na análise de segmentos das Cartas. Esta nova abordagem supera as limitações da abordagem de equiparação de forma geral, tradicionalmente usada. Os resultados de testes de classificação indicam potencial de exatidão superior aos apresentados no estado da arte, e a abordagem ainda oferece identificação de anomalias concomitantes ou limítrofes além de potencializar resultados quantitativos de severidade para as anomalias.

A revisão de trabalhos recentes indicou que a análise de segmentos da CDF tem maior potencial no diagnóstico dos SBM que abordagens de análise dos pontos da CDF como um todo. O estudo de métodos de análise de forma em contornos revelou que a análise de primitivas (segmentos) é mais eficiente em casos de formas com partes móveis. Como as CDFs podem ser interpretadas desse modo ao se analisar as variações possíveis de cada segmento dentro das classes de condições de bombeio, a pesquisa ofereceu grande suporte ao desenvolvimento do método apresentado.

O estudo das condições de bombeio nas CDFs do ponto de vista da segmentação pelos estágios do ciclo de bombeio ofereceu nova perspectiva sobre a classificação das mesmas, deixando claro que com localização dos pontos de abertura e fechamento de válvulas nas CDFs a análise pela interpretação dos segmentos entre eles teria maior consistência.

A técnica de segmentação das CDFs desenvolvida apresenta baixa complexidade, e testes demonstraram a robustez da mesma ao indicar a localização aproximada dos pontos de abertura e fechamento de válvulas em formas de CDFs das mais complexas de todas as 11 condições de bombeio relevantes (5 são irrelevantes pois são filtradas por algoritmos simples já apresentados na literatura).

Sendo o problema de análise de Sistemas de Bombeio Mecânico através das CDFs um processo de conhecimento especialista, é compreensível que especialistas diferentes tenham opiniões distintas sobre a mesma CDF, ou até que o mesmo especialista não seja consistente ao avaliar a mesma CDF em momentos diferentes. Os testes com sistemas *Fuzzy* criados com as estatísticas dos segmentos extraídos indicam a capacidade de replicar o raciocínio humano usado na classificação visual, oferecendo ainda consistência e exatidão.

A estratégia de alimentar os sistemas *Fuzzy* criados baseada no intervalo interquartil das características dos segmentos demonstrou grande eficácia ao revelar CDF com

características muito extremas possivelmente classificadas equivocadamente ou que representam sistemas de bombeio com mais de uma anomalia.

A abordagem permite ainda classificar isoladamente se uma CDF é da classe Normal ou tem alguma anomalia, independente do diagnóstico preciso da anomalia, o que é uma qualidade não encontrada em outros trabalhos na área. Na operação de bombeio é desejável algumas vezes que se continue operando mesmo com algum nível de anormalidade caso haja produtividade importante, e a quantificação de normalidade que esta nova abordagem oferece pode ser de grande valia para especialistas na área, ou mesmo para sistemas especialistas de tomada de decisão, com o objetivo de definir se a operação para e entra em manutenção ou se continua até que um grau de anormalidade limite seja atingido.

Os resultados dos testes de classificação demonstram a versatilidade da abordagem ao permitir diferentes análises a depender da condição de bombeio que se busca identificar, permitindo também o diagnóstico de condições de bombeio simultâneas na mesma CDF. Mesmo sem CDFs reais de todas as classes de condição de bombeio estudadas, a robustez da abordagem ficou demonstrada ao utilizar características de CDF artificiais geradas a partir da literatura. Os classificadores que foram gerados apenas com CDF artificiais demonstraram eficácia nas inferências de CDFs de poços reais da base de dados.

Outra vantagem da abordagem é permitir ajustes dos parâmetros e regras utilizados nos classificadores a partir de conhecimento de especialistas de forma intuitiva, devido aos fundamentos da lógica *Fuzzy* e também devido à utilização de características de interpretação visual.

Os resultados também indicam que a abordagem pode ser utilizada para se inferir o grau de severidade das anomalias, mas essa é uma qualidade que ainda precisa ser testada com propriedade em trabalhos futuros para garantir uma gradação adequada.

Fica também em aberto para trabalhos futuros o estabelecimento de regras de combinação entre os classificadores criados, de forma a fazer eliminações lógicas e aumentar a confiabilidade. Por exemplo, um especialista poderia definir que não é possível haver Interferência de Gás e Pancada de Fluido, e o classificador com maior saída de inferência seria o mais acertado.

A falta de CDF de poços reais de diversas classes de condições de bombeio é uma realidade deste e dos demais trabalhos na área. Uma vez disponibilizadas novas bases de dados com CDF reais, mais testes poderiam ser realizados, e, se necessário, ajustes nos parâmetros poderiam ser executados para possíveis melhorias no desempenho.

## 6 Referências

ABELLO, J.; HOUANG, A.; RUSSELL, J. A hierarchy of pattern recognition algorithms for the diagnosis of sucker rod pumped wells. **Proceedings of ICCI'93: 5th International Conference on Computing and Information**, p. 359–364, 1993.

BARRETO FILHO, M. DE A. **Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo**. Dissertação de Mestrado—[s.l.] UNICAMP, 1993.

BEZERRA, M. **Aplicação de redes neurais artificiais no reconhecimento de padrões de cartas dinamométricas de fundo em sistemas de bombeio mecânico de petróleo**. Dissertação de Mestrado—[s.l.] UFBA, 2010.

BEZERRA, M.; SCHNITMAN, L.; FILHO, M. B. Pattern Recognition for Downhole Dynamometer Card in Oil Rod Pump System using Artificial Neural Networks. **ICEIS (2)**, p. 2–5, 2009.

BISHOP, C. M. **Pattern Recognition and Machine Learning**. [s.l.] Springer, 2006. v. 4p. 738

BOWIE, J. E.; YOUNG, I. T.; WALKER, J. E. Analysis Technique for Biological Shape. **Acta cytologica**, v. 21, n. 6, p. 739–46, 1974.

CHAUDHURI, D. Global Contour and Region Based Shape Analysis and Similarity Measures. **Defence Science Journal**, v. 63, n. 1, p. 74–88, 2013.

CHELLAPPA, R.; BAGDAZIAN, R. Fourier coding of image boundaries. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 6, p. 102–105, 1984.

CHITALIYA, N. G.; TRIVEDI, A. I. Feature Extraction Using Wavelet-PCA and Neural Network for Application of Object Classification & Face Recognition. **2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications**, v. 2, p. 510–514, 2010.

CORRÊA, J. F. DOS S. **Sistema inteligente para aplicações de soluções ao bombeamento mecânico de petróleo**. Dissertação de Mestrado—[s.l.] UNICAMP, 1995.

DE LIMA, F. S.; GUEDES, L. A. H.; SILVA, D. R. **Application of Fourier Descriptors and Pearson Correlation for fault detection in Sucker Rod Pumping System** 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. **Anais...IEEE**, set. 2009. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5347072](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5347072)>. Acesso em: 16 fev. 2014

EICKMEIER, J. Diagnostic analysis of dynamometer cards. **Journal of Petroleum Technology**, 1967.

FLUSSER, J.; SUK, T. Pattern recognition by affine moment invariants. **Pattern Recognition**, v. 26, p. 167–174, 1993.

FREEMAN, H. On the encoding of arbitrary geometric configurations. **Electronic Computers, IRE Transactions on**, p. 260–268, 1961.

GARY, J. E.; MEHROTRA, R. Similar Shape Retrieval In Shape data management. n. September, 1995.

GIBBS, S. Predicting the behavior of sucker-rod pumping systems. **Journal of Petroleum Technology**, 1963.

GIBBS, S.; NEELY, A. Computer diagnosis of down-hole conditions in sucker rod pumping wells. **Journal of Petroleum Technology**, 1966.

GILBERT, W. An oil-well pump dynagraph. **Drilling and Production Practice**, n. 4, 1936.

GRANLUND, G. H. Fourier Preprocessing for Hand Print Character Recognition. **IEEE Transactions on Computers**, v. C-21, 1972.

GROSKY, W.; MEHROTRA, R. Index-based object recognition in pictorial data management. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, p. 416–436, 1990.

GROSKY, W.; NEO, P.; MEHROTRA, R. A pictorial index mechanism for model-based matching. **Data & knowledge engineering**, p. 180–187, 1992.

HARALICK, R. A measure for circularity of digital figures. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, n. July, p. 394–396, 1974.

HUA, L.; XUNMING, L. Accurate extraction of valve opening and closing points based on the physical meaning of surface dynamometer card. **Petroleum Exploration and Development**, v. 38, n. 1, p. 109–115, fev. 2011.

HUANG, R. Shape analysis using curvature-based descriptors and profile hidden markov models. **2007 4th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro - Proceedings (2007)**, n. 1, 2007.

IIVARINEN, J.; VISA, A. Shape recognition of irregular objects. **Photonics East'96**, 1996.

ISHIBUCHI, H.; NOJIMA, Y.; KUWAJIMA, I. **Computational Intelligence: A Compendium**. [s.l: s.n.]. v. 115p. 641–685

JUNDING, S.; HELI, X. Contour-Shape Recognition and Retrieval Based on Chain Code. **2009 International Conference on Computational Intelligence and Security**, v. 2, p. 349–352, 2009.

KEATING, J.; LAINE, R.; JENNINGS, J. Application of a Pattern-Matching Expert System to Sucker-Rod Dynamometer-Card Pattern Recognition. **SPE Production Operations ...**, 1991.

LI, K. et al. Using the curve moment and the PSO-SVM method to diagnose downhole conditions of a sucker rod pumping unit. **Petroleum Science**, v. 10, n. 1, p. 73–80, 7 fev. 2013.

LIMA, F. DE; GUEDES, L.; SILVA, D. **Comparison of Border Descriptors and Pattern Recognition Techniques Applied to Detection and Diagnose of Faults on Sucker-Rod Pumping System**. [s.l.] InTech, 2012.

LONCARIC, S. A survey of shape analysis techniques. **Pattern Recognition**, v. 31, n. 8, p. 983–1001, ago. 1998.

PALA, P.; DEL BIMBO, A.; BERRETTI, S. Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing. **IEEE Transactions on Multimedia**, v. 2, n. 4, p. 225–239, 2000.

PEURA, M.; IIVARINEN, J. Efficiency of simple shape descriptors. In: **In Aspects of Visual Form**. [s.l.: s.n.]. p. 443–451.

PROFFITT, D. The measurement of circularity and ellipticity on a digital grid. **Pattern Recognition**, n. 5, p. 0–4, 1982.

REGES, G. D.; SCHNITMAN, L.; REIS, R. A. Application of curvature-based descriptors for fault diagnosis in sucker rod oil pumping systems. **ICPR 22 Proceedings**, 2013.

ROSIN, P. L. Measuring rectangularity. **Machine Vision and Applications**, v. 11, n. 4, p. 191–196, 16 dez. 1999.

SCHNITMAN, L.; ALBUQUERQUE, G.; CORRÊA, J. **Modeling and implementation of a system for sucker rod downhole dynamometer card pattern recognition** SPE Annual Technical Conference Exhibition. **Anais...** Denver: SPE, 2003. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-84140-MS>>. Acesso em: 7 out. 2014

SOUZA, A. DE; BEZERRA, M. Using artificial neural networks for pattern recognition of downhole dynamometer card in oil rod pump system. **Proceedings of the 8th WSEAS Int. Conf. on ARTIFICIAL INTELLIGENCE, KNOWLEDGE ENGINEERING & DATA BASES (AIKED '09)**, p. 230–235, 2009.

TAKÁCS, G. **Sucker-rod pumping manual**. [s.l.] PennWell, 2003.

THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. **Pattern Recognition**. [s.l.: s.n.]. p. 1–12

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

UPTON, G.; COOK, I. T. **Understanding Statistics**. [s.l.] Oxford University Press, 1996.

XU, P.; XU, S.; YIN, H. Application of self-organizing competitive neural network in fault diagnosis of suck rod pumping system. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 58, n. 1-2, p. 43–48, ago. 2007.

ZHANG, D.; LU, G. Review of shape representation and description techniques. **Pattern Recognition**, v. 37, n. 1, p. 1–19, jan. 2004.

ZHANG, J.; WENYIN, L. A Pixel-level Statistical Structural Descriptor for Shape Measure and Recognition. **2009 10th International Conference on Document Analysis and Recognition**, p. 386–390, 2009.



## TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA

### 1 Identificação do tipo de documento

Tese [  ] Dissertação [  ] Monografia [  ] Trabalho de Conclusão de Curso [  ]

### 2 Identificação do autor e do documento

Nome completo: Galdir Damasceno Reges Junior

CPF: 09377006732

Telefone: 7187299434 e-mail: galdir@gmail.com

Programa/Curso de Pós-Graduação/Graduação/Especialização: PPGM - Mestrado em Mecatrônica

Título do documento: Nova abordagem para auxílio ao diagnóstico de sistemas de bumbo mecânico de petróleo através da

análise de segmentos de Cartas Dinamométricas

Data da defesa: 29/08 / 14

### 3 Autorização para publicação na Biblioteca Digital da UFBA

Autorizo com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998 e na Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, a Universidade Federal da Bahia (UFBA) disponibilizar gratuitamente sem ressarcimento dos direitos autorais, o documento supracitado, de minha autoria, na Biblioteca Digital da UFBA para fins de leitura e/ou impressão pela Internet a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Texto completo [  ] Texto parcial [  ]

Em caso de autorização parcial, especifique a (s) parte(s) do texto que deverão ser disponibilizadas:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Local Data

Salvador 26/11/2014

Assinatura do (a) autor (a) ou seu representante legal

Galdir Damasceno Reges Junior

### 4 Restrições de acesso ao documento

Documento confidencial? [  ] Não

[  ] Sim Justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data a partir da qual poderá ser disponibilizado na Biblioteca Digital da UFBA:

26/11/2014

[  ] Sem previsão

Assinatura do Orientador: \_\_\_\_\_ (Opcional)

O documento está sujeito ao registro de patente? Não [  ]

Sim [  ]

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim [  ]

Não [  ]

Preencher em três vias. A primeira via deste formulário deve ser encaminhada ao Sistema de Bibliotecas da UFBA/Biblioteca Central, a segunda deve ser enviada para a Biblioteca de sua Unidade, juntamente com o arquivo contendo o documento; a terceira via deve permanecer no Programa de Pós-Graduação para o registro do certificado de conclusão do Curso.



Salvador, 21/11/2014

## DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o texto final apresentado para a conclusão do meu curso de Mestrado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia é de minha autoria. Declaro também que quaisquer informações utilizadas neste texto, mas que sejam provenientes de outros trabalhos tem fonte claramente expressa e, quando for o caso, foram devidamente autorizadas pelo(s) respectivo(s) autor(es).

  
Nome: Galdir Damasceno Reges Junior  
CPF: 09377006732