

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Raciocínio Baseado em Casos Aplicado ao Projeto de Poços de Petróleo

Autor: **José Ricardo Pelaquim Mendes**
Orientador: **Celso Kazuyuki Morooka**

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Tese de doutorado apresentada à Sub-Comissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2001
S.P. - Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

TESE DE DOUTORADO

**Raciocínio Baseado em Casos Aplicado ao
Projeto de Poços de Petróleo**

Autor: **José Ricardo Pelaquim Mendes**

Orientador: **Celso Kazuyuki Morooka**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka, Presidente
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Heitor Rodrigues de Paula Lima
Petrobras

Prof. Dr. Ivan Rizzo Guilherme
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Paulo Roberto Ribeiro
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Euclides de Mesquita Neto
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 6 de Dezembro de 2001

Dedicatória:

Aos meus pais pelo constante apoio e confiança.

À Nina pelo carinho e paciência.

Agradecimentos

À ANP - PRH-ANP/MME/MCT e ao CEPETRO pelo apoio financeiro.

Ao amigo e orientador pelas oportunidades concedidas ao longo desses anos.

Aos Engenheiros Kazuo e Victorino pelas sugestões e esclarecimentos.

À bibliotecária Alice e à secretária Fátima pela assistência e gentileza que sempre me atenderam.

Aos alunos e professores do DEP pela convivência e amizade.

Um agradecimento final, em especial, ao amigo Prof. Ivan pelas valiosas sugestões sem as quais este trabalho não seria possível.

Resumo

MENDES, José Ricardo Pelaquim Mendes. *Raciocínio Baseado em Casos Aplicado ao Projeto de Poços de Petróleo*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 99p. Tese (Doutorado)

A perfuração de poços de petróleo é uma operação dispendiosa e de alto risco. Neste contexto, o projeto de poços aparece como peça fundamental para a diminuição dos custos e riscos envolvidos. Nota-se que é a experiência adquirida pelos engenheiros o fator preponderante para elaboração de bons projetos de perfuração. Logo, a perda deste conhecimento pode acarretar problemas e custos adicionais. Dessa forma, este trabalho representa uma iniciativa de modelar uma arquitetura baseada em casos para projetos de poços de petróleo. Os testes realizados com um protótipo mostrou que o sistema construído, com tal arquitetura, pode ser um auxílio na elaboração do projeto de poços, além de propiciar a preservação do conhecimento corporativo. Também foi possível conjecturar a aplicação da arquitetura para estudos comparativos de dados de perfuração.

Palavras Chave

- Projeto de Poços, Perfuração, Raciocínio Baseado em Casos, Conjuntos Nebulosos, Algoritmos Genéticos, Inteligência Artificial

Abstract

MENDES, José Ricardo Pelaquim Mendes. *Case-Based Reasoning for Petroleum Well Design*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 99p. Tese (Doutorado)

Petroleum well drilling is an expensive and risky operation. In this context, well design presents itself as a fundamental key to decrease costs and risks involved. Experience acquired by engineers is notably a preponderant factor in good drilling design elaboration. Therefore, losing of this knowledge may entail additional problems and costs. In this way, this work represents an enterprise to model a petroleum well design case-based architecture. Tests with prototypes showed that the system built with this architecture may help in well design elaboration and enable corporative knowledge preservation. It was also possible to find an application of this architecture in drilling data benchmarking processes.

Key Words

-Well Design, Drilling, Case-Based Reasoning, Fuzzy Sets, Genetic Algorithms, Artificial Intelligence.

Índice

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos do Trabalho.....	2
1.2 Organização do Trabalho.....	3
2. Projeto de Poços de Petróleo.....	4
2.1 Atividades Envolvidas.....	4
2.2 Áreas Envolvidas.....	10
3. Raciocínio Baseado em Casos para Projeto de Poços.....	12
3.1 Fundamentos de Raciocínio Baseado em Casos.....	12
3.2 Uma Arquitetura Baseada em Casos para Projeto de Poços.....	15
4. Indexação.....	18
4.1 Base de Casos.....	18

4.2 Atributos de Indexação.....	19
4.3 Teoria de Conjuntos Nebulosos no Tratamento dos Atributos de Indexação.....	21
4.4 Espaço Nebuloso de Casos.....	26
4.5 Os Casos.....	31
5. Busca.....	35
5.1 Cálculo de Similaridades.....	35
5.2 Região de Casos Similares.....	39
5.3 Identificação dos Casos Promissores.....	40
6. Adaptação.....	45
6.1 Relevância dos Poços Recuperados pelo Processo de Busca.....	45
6.2 Poços “Frankenstein”.....	48
6.2.1 Fundamentos de Algoritmos Genéticos.....	49
6.2.2 Algoritmo Genético na Adaptação de Poços.....	55
6.3 Dimensionamento do Projeto.....	63
7. Armazenamento e Esquecimento.....	65
7.1 Fundamentos de Curvas de Aprendizado.....	65
7.2 Curvas de Aprendizado na Avaliação de Poços.....	67
7.3 Esquecimento.....	71
8. Testes.....	72

8.1 Poços Utilizados nos Testes.....	72
8.2 Indexação e Busca.....	78
8.3 Adaptação.....	82
8.4 Armazenamento.....	89
9. Conclusões.....	92
Referências Bibliográficas.....	95

Lista de Figuras

2.1 Atividades envolvidas no processo de desenvolvimento do projeto de poços de petróleo.....	5
2.2 Organograma exemplificando uma possível divisão em áreas das atividades envolvidas na elaboração do projeto de poços de petróleo.....	10
3.1 Como os processos de busca, adaptação e armazenamento atuam nos espaços de descrição de problemas e soluções. Adaptado de Leake (1996).....	15
3.2 Arquitetura de um sistema baseado em casos, para auxiliar no projeto de poços de petróleo.....	17
4.1 Representação espacial dos casos no espaço de casos.....	19
4.2 Exemplo de uma função de pertinência para o conjunto nebuloso de poços profundos.....	23
4.3 Variável lingüística Profundidade.....	24
4.4 Atributos de indexação tratados como variáveis lingüísticas.....	25
4.5 Exemplo numérico do processo de indexação de um caso na base de casos.....	29
4.6 Ilustração geométrica em três dimensões de um caso com 900 metros de lâmina d'água e 30 graus de ângulo médio de desvio. Este caso é representado no espaço Ω por um ponto.....	30

4.7 Representação de dois <i>frames</i> genéricos com herança hierárquica. (b) Representação resumida de um <i>frame</i> Caso.....	32
4.8 Sistema de <i>frames</i> utilizado na representação dos casos.....	33
5.1 Exemplo de cálculo da similaridade entre dois conjuntos nebulosos.....	37
5.2 Exemplo de esfera de similaridade.....	40
5.3 Funções de pertinência dos atributos de similaridade utilizados na investigação do interior da esfera de similaridade.....	43
6.1 Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos de poços recentes, poços com baixa severidade nas anormalidades e poços com boa taxa de penetração.....	47
6.2 Exemplo do método da roleta utilizado pelo operador de seleção (Goldberg, 1989).....	53
6.3 Exemplo de operadores genéticos aplicados em cromossomos com representação binária (Goldberg, 1989): (a) <i>crossover</i> de um ponto e (b) mutação.....	54
6.4 Diagrama do algoritmo genético empregado.....	56
6.5 Representação genética de um poço <i>A</i> dividido em <i>n</i> trechos-poço.....	57
6.6 Exemplo numérico do operador de <i>crossover</i> utilizado.....	59
6.7 Projeções vertical e horizontal de um poço “Frankenstein”.....	62
7.1 Curva de aprendizado proposta por Wright (1936).....	67
7.2 Curva de aprendizado proposta por Brett & Millheim (1986).....	68
7.3 Exemplo de uma curva de aprendizado típica segmentada em atividades.....	70
8.1 (a) Esquema da plataforma com os níveis de referência; (b) Vista horizontal dos poços.....	73

8.2 Esquema do poço MA1.....	73
8.3 Esquema do poço MA2.....	74
8.4 Esquema do poço MA3.....	74
8.5 Esquema do poço MA4.....	75
8.6 Esquema do poço MA5.....	75
8.7 Esquema do poço MA6.....	76
8.8 Esquema do poço MA7.....	76
8.9 Tempos totais para realização dos poços e tempos perdidos com anormalidades.....	77
8.10 Taxas de penetração dos poços.....	77
8.11 Valores de similaridade e similaridade total considerando o poço MA3 como projeto.....	81
8.12 Valores de relevância e similaridade total, considerando o poço MA3 como projeto.....	83
8.13 Desempenho do algoritmo genético.....	86
8.14 Indivíduo — com valor relevância 0,98 — gerado pelo algoritmo genético após 21 gerações.....	87
8.15 Pressões de poros e esquemas de revestimentos para os poços “Frankenstein” e MA3.....	88
8.16 Curvas de aprendizado para atividades específicas.....	90

Lista de Tabelas

4.1 Notação para as funções de pertinência dos conjuntos nebulosos da Figura 4.4.....	28
6.1 Exemplo de representação binária.....	51
8.1 Índices obtidos para os poços MA1, MA2, MA3, MA4, MA5, MA6, MA7.....	78
8.2 Pesos adotados para o cálculo das similaridades.....	80
8.3 Valores de similaridade entre os poços.....	80
8.4 Valores de similaridade total entre os poços.....	80
8.5 Pesos adotados para o cálculo da relevância.....	82
8.6 Valores de relevância entre os poços.....	82
8.7 Topos e bases dos trechos-poço utilizados na representação genéticos dos poços.....	84
8.8 Tempos totais e perdidos com anormalidades em cada trecho-poço.....	85

Nomenclatura

A conjunto nebuloso

$(a_1, \dots, a_n)$ graus de pertinência representando um conjunto nebuloso A discreto

$d(A, B)$ distância entre dois conjuntos nebulosos A e B

$\max(a, b)$ máximo de a e b

$\min(a, b)$ mínimo de a e b

$S_\delta(A_i)$ esfera de similaridade centrada em A_i com raio $r=1-\delta$

w_j peso associado ao elemento j

δ similaridade mínima

$\mu_A(x)$ função de pertinência para o elemento x com respeito ao conjunto nebuloso A

Ω espaço nebulosos de casos

Capítulo 1

Introdução

Com o desenvolvimento da indústria do petróleo, os poços de petróleo têm se tornado mais sofisticados, necessitando de um espectro de informações cada vez maior para sua elaboração. Essa tendência é em parte fruto das descobertas de campos de petróleo, de grande interesse econômico, em locais com condições naturais tecnicamente complexas — tais como águas profundas da plataforma continental. Tal situação gera uma elevada demanda de recursos na busca de tecnologias apropriadas, para o desenvolvimento desses campos, e, conseqüentemente, o projeto dos poços torna-se mais aprimorado e complexo. Esse processo de busca de novas tecnologias têm evidenciado que a experiência, adquirida pelos engenheiros especialistas responsáveis pelo projeto dos poços, é o fator preponderante para elaboração de bons projetos de perfuração. Em vista disso, a perda deste conhecimento pode ocasionar problemas e custos adicionais¹. Por outro lado, a preservação de tal conhecimento não é uma tarefa simples, uma vez que na indústria do petróleo as inovações tecnológicas são bastante dinâmicas e somente um pequeno grupo de especialistas tem o domínio sobre as inovações.

¹ Isto pode ser comprovado pelo estudo desenvolvido por Brett & Milheim (1986) sobre curvas de aprendizado aplicadas à análise da perfuração de poços. Este estudo mostra situações onde a perda do conhecimento de “como perfurar uma dada área” acarretaram um tempo maior na perfuração. Este atraso foi causado por problemas que no passado já tinham sido contornados.

Perante esse cenário, nas últimas décadas, a inteligência artificial tem ganhado cada vez mais espaço no setor. Atualmente, talvez ela já seja aceita como uma vantagem estratégica na obtenção de novas soluções não somente na engenharia de poços, mas em toda indústria do petróleo. Isto pode ser observado pelo crescente número de publicações. Destas publicações as mais importantes são Braunschweig (1995) e SPE Reprint Series no. 41, as quais reúnem várias aplicações desta natureza.

1.1 Objetivos do Trabalho

De uma forma geral, a abordagem de trabalho dos especialistas responsáveis pelo projeto dos poços de petróleo consiste, numa primeira etapa, nas análises dos dados provenientes de poços já perfurados. Nesse tipo de análise é possível buscar dados novos e identificar os mais confiáveis, assim como, estudar acertos e erros cometidos em projetos anteriores. Esse processo de estudo promove o pré-estabelecimento de algumas condições para o projeto de novos poços. Ou seja, para determinadas regiões, devido às características geológicas e, principalmente, à experiência de perfuração adquirida nestes locais, alguns dos elementos do projeto são padronizados. Assim, em muitos projetos de poços novos, o engenheiro possui um padrão inspirado em experiências anteriores daquela área. Esse cenário, abre a possibilidade para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie na elaboração do projeto de poços. Pois, no contexto da inteligência artificial, essa abordagem de trabalho dos especialistas enquadra-se perfeitamente na metodologia de raciocínio baseado em casos. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivos:

- Formalizar a metodologia empregada na elaboração do projeto de poços de petróleo para o contexto de raciocínio baseado em casos;
- Em paralelo a tal formalização, definir uma arquitetura baseada em casos no desenvolvimento de um sistema inteligente que auxilie na elaboração do projeto de poços de petróleo.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em nove capítulos com a seguinte disposição:

- O Capítulo 2 apresenta as principais atividades envolvidas na elaboração do projeto de poços de petróleo. Procurou-se mostrar como estas atividades se relacionam, para proporcionar uma visão geral da área de projeto de poços;
- O Capítulo 3 propõe uma arquitetura baseada em casos para projeto de poços de petróleo. Para isso, inicialmente são introduzidos os conceitos básicos da metodologia de raciocínio baseado em casos, com a descrição dos principais processos envolvidos. Os capítulos seguintes são dedicados a uma descrição detalhada da arquitetura proposta neste trabalho;
- O Capítulo 4 trata dos problemas de indexação dos poços — casos — na arquitetura. É apresentada uma sugestão de atributos para indexação e proposta uma abordagem, com conjuntos nebulosos, para o tratamento destes atributos;
- O Capítulo 5 aborda o problema da identificação de casos que sejam adequados para elaboração do projeto de um novo poço. Para isso, foram descritas métricas para fazer a comparação dos casos;
- O Capítulo 6 trata da adaptação dos casos identificados para serem aplicados na elaboração do projeto de um novo poço. Para tal centrou-se a análise na identificação das informações mais adequadas ao projeto e como utilizar tais informações para compor novos casos;
- O Capítulo 7 aborda o armazenamento de casos de novos poços, assim como, a manutenção de tais casos na arquitetura. Para isso, neste capítulo discute-se a utilização de curvas de aprendizado como ferramenta de análise;
- O Capítulo 8 visa ilustrar os processos componentes da arquitetura proposta e, principalmente, averiguar a validade destes processos;
- O Capítulo 9 apresenta as conclusões obtidas no decorrer deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Projeto de Poços de Petróleo

A perfuração de poços de petróleo é uma operação dispendiosa e de alto risco. É neste contexto que o projeto de poços aparece como peça fundamental para a diminuição dos custos e riscos envolvidos. Neste capítulo, são apresentadas as principais atividades do processo construtivo do projeto de poços de petróleo. Ressaltamos que essas atividades são extremamente dinâmicas e dependentes entre si. Por essa razão, para mostrar a relação entre essas atividades e proporcionar um panorama da área de projeto de poços de petróleo, adotou-se uma abordagem qualitativa no tratamento de tais atividades.

2.1 Atividades Envolvidas

Em geral, o projeto de um poço de petróleo pode ser definido como um processo iterativo, envolvendo especialistas e informações, com o propósito de formular um plano com detalhes suficientes para a perfuração do poço de forma segura e econômica. Esse processo é caracterizado por um conjunto de atividades as quais algumas apresentam uma forte relação de interdependência entre si. Devido essa interdependência, as atividades não são necessariamente desenvolvidas sequencialmente. Na maioria das situações, elas são desenvolvidas de forma simultânea e interativa, sendo que, a iteratividade provém da necessidade de otimização do

projeto. Na Figura 2.1, estão as principais atividades envolvidas no processo construtivo do projeto de um poço. Dependendo do detalhamento que se deseja, algumas dessas atividades podem ser subdivididas em atividades menores. Por exemplo, a atividade responsável em definir o programa de brocas pode ser subdividida em: seleção das brocas, definição dos parâmetros mecânicos e definição dos parâmetros hidráulicos.

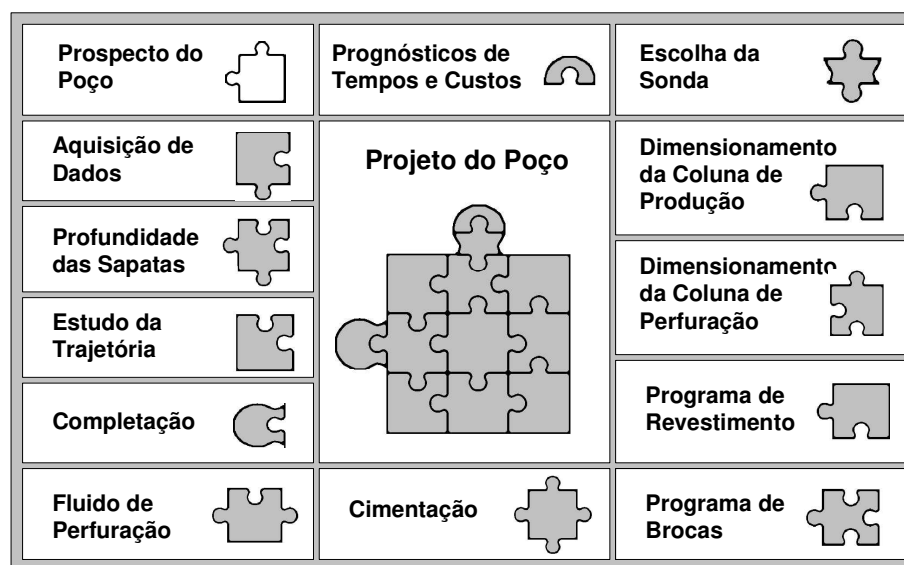


Figura 2.1: Atividades envolvidas no processo de desenvolvimento do projeto de poços de petróleo.

As primeiras informações recebidas para a elaboração do projeto de um poço estão no prospecto. Nele, são fornecidos a finalidade do poço, localização, reservatórios objetivos com profundidades, mapas da região, etc. O conteúdo e o detalhamento dessas informações dependem, principalmente, da finalidade do poço. Para poços exploratórios, o prospecto é relativamente simples, uma vez que são perfurados dentro dos limites de um campo conhecido e, portanto, requerem menos planejamento. No entanto, para poços exploratórios, é necessário um esforço maior na elaboração do projeto, pois normalmente são perfurados em regiões pouco conhecidas geologicamente. Este último é um empreendimento de alto risco, logo o prospecto deve ser o mais detalhado possível, para minimizar tais riscos.

Com o prospecto do poço, parte-se para a etapa de aquisição de dados. Esta é uma atividade fundamental para que o projeto tenha uma boa margem de sucesso. Ela dá suporte para se conhecer as condições que serão encontradas durante a perfuração do poço. Estas condições são normalmente obtidas por meio de dados fornecidos pela geologia e, principalmente, pela análise dos poços de correlação. Através destes poços o engenheiro pode prever possíveis problemas e adequar o projeto para evitá-los. A escolha dos poços de correlação, bem como, a interpretação dos dados relacionados a tais poços são extremamente dependentes da experiência do engenheiro. Segundo Sato (1992), para poços exploratórios as principais informações que são analisadas são:

- *Registro de brocas*: o estudo das brocas utilizadas com seus parâmetros hidráulicos e mecânicos permite avaliar o desempenho destas brocas e dar indicativos das melhores opções para o projeto de um novo poço.
- *Revestimentos e profundidade das sapatas*: estas informações são um bom ponto de partida para o dimensionamento das colunas de revestimento e posicionamento das sapatas para o novo poço.
- *Fluidos de perfuração*: muitos problemas nos poços podem ter sua causa no tipo fluido de perfuração ou em parâmetros reológicos inadequados. Uma análise dos fluidos utilizados nos poços de correlação é importante para uma escolha acertada para o projeto.
- *Formações e litologias*: estas informações são importantes para a obtenção de um prognóstico geológico mais preciso para o novo poço.
- *Pressão de poros e fratura*: estas informações são, na maioria das situações, os maiores problemas no projeto. Normalmente, estes dados quando estão disponíveis carecem de precisão e, conseqüentemente, não possuem um grau de confiança satisfatório para o projeto. Para contornar o problema, recorre-se aos poços de correlação com a intenção de diminuir a incerteza associada a esses valores.
- *Problemas*: o estudo dos problemas ocorridos nos poços de correlação é importante para que se possa antecipá-los e evitá-los, ou pelo menos, amenizar suas conseqüências em um novo poço.

Dentre essas informações a determinação da pressão de poros é muito importante, pois o seu conhecimento norteia o planejamento do peso do fluido de perfuração e dos revestimentos. Desta maneira, a perfuração torna-se mais segura e econômica, visto que diminui os riscos de *kicks*² e permite a utilização de fluidos mais leves com pesos suficientes para evitar a entrada de fluidos da formação para o poço. A avaliação da pressão de poros também é útil no estudo da estabilidade das paredes do poço e na determinação da pressão de fratura. Por outro lado, o conhecimento da pressão de fratura é de fundamental importância para o assentamento das sapatas dos revestimentos. Infelizmente, tanto para a pressão de poros como a de fratura, pode ser muito difícil obter prognósticos confiáveis. As determinações teóricas de tais pressões, normalmente, fornecem resultados pouco precisos. Os métodos que produzem resultados mais confiáveis provêm da análise de poços de correlação.

Para o posicionamento das sapatas dos revestimentos, são adotados critérios afim de isolar zonas que possuem alta probabilidade de trazer problemas à perfuração do poço. Dentre esses problemas os mais comuns são: prisão de coluna por diferencial de pressão, perda de fluido de perfuração para as formações, desmoronamento das paredes do poço, ocorrência de *kicks*, etc. Em poços profundos tais critérios são mais rigorosos. É necessário principalmente o conhecimento das pressões de poros e fratura — pelo menos dentro de uma margem de incerteza aceitável — além do conhecimento de zonas problemáticas.

Outra atividade é o estudo e definição da melhor trajetória para o poço. Esta afeta quase todo o projeto. Por exemplo, em poços direcionais, são necessários revestimentos mais resistentes para suportar as tensões axiais — devido ao dobramento dos tubos —, fluidos de perfuração com melhores características lubrificantes — para reduzir o atrito nas paredes do poço—, ferramentas especiais para a perfuração direcional, etc. Todos esses fatores contribuem para que o custo de um

² *Kick*: influxo de fluido da formação para dentro do poço. Ocorre quando a pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração é insuficiente para contrabalançar a pressão exercida pelos fluidos confinados nos poros das formações permeáveis.

poço direcional seja maior que um poço convencional. No estudo da melhor trajetória, normalmente, são considerados a inclinação das camadas e suas tendências de desvio; presença de formações desmoronáveis, fraturas e falhas; ângulo no qual o objetivo deve ser alcançado, pressões de poro e fratura das formações, uso de ferramentas especiais para a perfuração direcional.

A completação tem reflexos em vários aspectos do projeto e em toda a vida produtiva do poço. Seu planejamento, pelo menos as diretrizes, deve ser feito antes da perfuração, durante a elaboração do projeto. Por exemplo, num poço onde se adota a completação múltipla, será necessário um diâmetro maior para o revestimento de produção e isso afeta diretamente o dimensionamentos dos outros revestimentos. Os principais fatores considerados no planejamento da completação são: a finalidade do poço, locação — no mar ou em terra —, vazões esperadas e propriedades físicas dos fluidos a serem produzidos, necessidade de elevação artificial, número de zonas produtoras. Observe que a completação envolve especialistas da geologia, perfuração, produção e reservatórios.

O fluido de perfuração tem grande influência nos custos, na segurança e estabilidade do poço. Suas propriedades físicas devem minimizar a ocorrência de problemas, tais como inchamento de argilas expansíveis, desmoronamentos, alargamentos excessivos, etc. O programa de fluido de perfuração deve considerar o tipo de formações a serem perfuradas, o tempo que o fluido estará exposto a formação, os limites de temperatura, resistência, permeabilidade e pressão de poros das formações e condições de preservação do meio ambiente. A pressão hidrostática do fluido deve situar-se sempre na faixa entre as pressões de poros e fratura.

A cimentação deve fixar a tubulação e evitar a comunicação de fluidos entre as diversas zonas permeáveis atravessadas pelo poço. Ela consiste, basicamente, em bombear uma pasta de cimento e água através da coluna de revestimento até o espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço. A definição da composição química do cimento é realizada em função das condições a serem encontradas no poço, tais como temperatura, tipo de formação, profundidade, etc. A

cimentação é uma área extremamente especializada sendo comum a assistência de especialistas, associada às companhias de serviço.

A seleção das brocas, assim como os seus parâmetros mecânicos e hidráulicos são definidos, principalmente, com dados de poços de correlação e pela experiência do engenheiro responsável. Mais precisamente, são considerados os tipos de formações a serem atravessadas, as propriedades físicas dessas formações, os fluidos de perfuração, os custos das brocas, dados dos fabricantes de brocas e perfis geológicos.

Para o dimensionamento e seleção dos tubos das colunas de revestimentos são necessárias previsões das tensões que atuarão em tais colunas durante a instalação e ao longo de suas vidas úteis, assim como de informações sobre a estabilidade do poço. Agora, para o dimensionamento e seleção dos tubos da coluna de produção, além das previsões das tensões que atuarão na coluna, deve-se considerar a máxima vazão esperada e as propriedades físicas do fluido que será produzido. Com relação aos diâmetros dos revestimentos, estes dependem do diâmetro interno do revestimento de produção e do número de fases pretendido para o poço. Quanto ao dimensionamento e seleção dos tubos para a coluna de perfuração, é necessário o conhecimento dos pesos dos fluidos de perfuração, os pesos sobre broca previstos e a profundidade total prevista da coluna.

Em relação à sonda de perfuração, a escolha inadequada pode elevar os custos do projeto, provocar danos nas formações produtoras e, principalmente, causar acidentes. Para uma escolha adequada, os principais fatores considerados são: local da perfuração, finalidade do poço, questões logísticas de deslocamento, treinamento e experiência do pessoal da sonda, relação custo e benefício. Quando a perfuração é no mar, são considerados ainda a lâmina d'água, condições do mar e relevo do fundo do mar.

Por fim, os tempos necessários para as operações de perfuração possuem um grande impacto nos custos do poço. Uma estimativa de custos em termos de materiais não apresenta grandes dificuldades, uma vez que estes são especificados, baseado nos resultados dos dimensionamentos. No entanto, uma estimativa de custos de equipamentos necessita da previsão do número de dias para as operações de perfuração. Normalmente, para tal previsão recorre-se à análise dos poços de correlação.

Para estudos mais detalhados sobre as atividades envolvidas na elaboração do projeto de um poço de petróleo sugerimos Adams (1985), Short (1983), Bourgoyne *et al.* (1986) e Aadnoy (1997). Afim de proporcionar uma visão mais ampla, na próxima seção será ilustrada uma possível divisão em áreas destas atividades.

2.2 Áreas Envolvidas

A elaboração do projeto raramente é desenvolvida por uma única pessoa. Normalmente, numa empresa de petróleo, as atividades anteriormente descritas estão agrupadas em áreas com equipes especializadas. Esta divisão depende da filosofia de atuação de cada empresa e da disponibilidade de mão-de-obra especializada. Por isso, a estrutura apresentada na Figura 2.2 é apenas um exemplo de como as atividades podem ser organizadas, no entanto, ela não deve se distanciar muito das estruturas existentes nas diversas empresas do ramo.

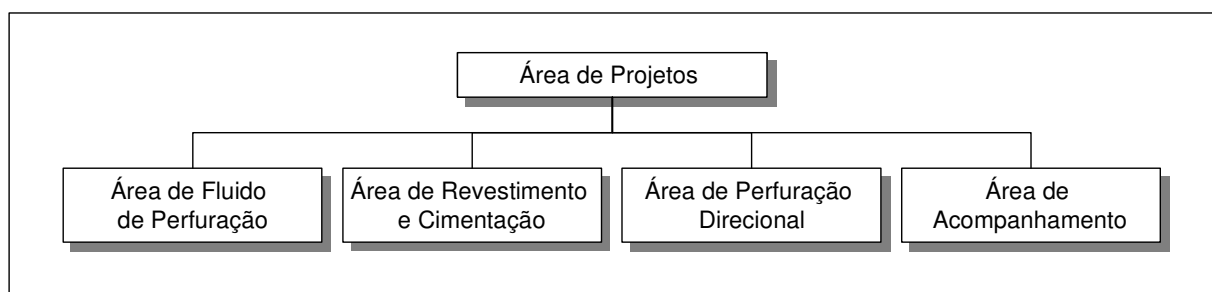


Figura 2.2: Organograma exemplificando uma possível divisão em áreas das atividades envolvidas na elaboração do projeto de poços de petróleo.

Nesta estrutura, a área de projetos coordena todo o processo de desenvolvimento do projeto, tomando decisões, gerenciando e distribuindo as informações para cada área específica. O fluxo de informações entre as áreas específicas é constante, pois muitas atividades do projeto dependem do estudo das outras áreas. Neste exemplo cada área possui as seguintes responsabilidades:

- *Área de fluido de perfuração*: estuda os problemas envolvidos em sua área de atuação e com isto define o fluido de perfuração e a reologia adequada a cada fase;
- *Área de revestimento e cimentação*: também deve considerar os problemas envolvidos em sua área para fazer o dimensionamento dos revestimentos e plano de cimentação;
- *Área de perfuração direcional*: caso o poço seja direcional, esta área deve determinar a melhor trajetória;
- *Área de acompanhamento*: acompanha as operações de perfuração com a intenção de prevenir possíveis problemas ou pelo menos amenizá-los. Também é responsável pela elaboração de relatórios técnicos das atividades desenvolvidas na operação;
- *Área de projetos*: gerencia as informações entre as áreas, define a configuração do poço, posicionamento das sapatas, plano de brocas, dimensionamento das colunas, cimentação e, por fim, o plano de conclusão.

Capítulo 3

Raciocínio Baseado em Casos para Projeto de Poços

O princípio do raciocínio baseado em casos é solucionar problemas novos por analogia com os antigos. Este princípio possui um grande potencial de aplicação, como ferramenta computacional, na realização de projeto de poços, pois, na prática, muitos projetos estão calcados em análises de poços correlacionáveis aos prospectos dos poços pretendidos. Em vista disso, este capítulo possui dois objetivos: primeiro, introduzir os conceitos do raciocínio baseado em casos, e segundo, definir uma arquitetura baseada em casos para área de projeto de poços. A formalização e o detalhamento dos componentes de tal arquitetura prosseguem nos capítulos seguintes.

3.1 Fundamentos de Raciocínio Baseado em Casos

Observações sobre o comportamento cognitivo humano sugerem que as pessoas quando solucionam ou interpretam problemas, muitas vezes se apóiam em experiências prévias. Segundo Leake (1996), os seres humanos são robustos resolvidores de problemas; eles freqüentemente resolvem problemas difíceis, apesar das limitações e incertezas que possam haver no conhecimento, melhorando seu desempenho com a experiência. Estas observações têm encorajado o estudo e desenvolvimento de sistemas inteligentes que solucionam problemas novos por analogia com problemas antigos. É neste contexto que surgem os sistemas computacionais

inteligentes os quais fazem uso do raciocínio baseado em casos³ (Kolodner, 1993; Leake, 1996) — sistemas baseados em casos.

O campo de pesquisa em raciocínio baseado em casos é bastante amplo. A saber, ele envolve tanto as áreas interessadas no comportamento cognitivo humano quanto as interessadas na inteligência artificial. Assim, afim de evitar divagações sobre a natureza do pensamento humano, traçamos uma perspectiva sobre a discussão que se segue, detendo-nos em uma análise focada para a área tecnológica. Portanto, para o contexto deste trabalho, o raciocínio baseado em casos é uma metodologia que fornece fundamentação para a construção de sistemas inteligentes que utilizam experiências prévias — casos — para resolver novos problemas.

Nesses sistemas, a solução de um problema é obtida pela reutilização de casos semelhantes previamente armazenados numa base de casos. Para a identificação de tais casos, dentre os casos armazenados, é necessário um mecanismo de indexação e um processo de busca. Ou seja, os casos são identificados por um conjunto de características — índices — os quais são utilizados pelo processo de busca. Quando o processo de busca identifica um caso que coincide exatamente com um dado problema, a solução associada a tal caso pode ser aplicada diretamente. Porém, o resultado do processo de busca quase sempre é um conjunto de casos com diferentes graus de coincidência — similaridades — com o problema presente. Nesta circunstância, a etapa seguinte consiste em adaptar os melhores casos com o propósito de obter uma solução. Essa etapa é realizada por um processo de adaptação o qual identifica as partes dos casos que não se “amoldam” ao problema e as substituem. Evidentemente, quanto maior a similaridade entre os casos e o problema, menor é a atuação do processo de adaptação. No entanto, a adaptação dos casos implica na presença de um processo de avaliação o qual garanta a aplicabilidade da solução adaptada antes de sua utilização. Tal avaliação pode ser realizada por uma simulação em computador ou mesmo por um julgamento humano. Por fim, após a resolução do problema, a

³ Alguns autores preferem utilizar a expressão original inglês, *case-based reasoning*.

solução é armazenada na base de casos como um novo caso — processo de armazenamento — para que possa ser utilizado em problemas posteriores. Para uma melhor compreensão compare esses processos com a Figura 3.2.

O raciocínio baseado em casos é apropriado para domínios onde as situações tenham uma certa tendência a se repetirem. Ele também trabalha com a hipótese da regularidade, ou seja, as mesmas ações e operações aplicadas em situações similares terão, a princípio, conseqüências também similares. Em relação ao desempenho dos sistemas que empregam tal metodologia, esse vai depender das experiências armazenadas na forma de casos e nos algoritmos adotados para realizar os processos mencionados. Em síntese, os principais elementos que caracterizam a arquitetura dos sistemas baseados em casos são:

- *Base de casos*: é uma biblioteca de experiências — casos — a qual o sistema recorre para solucionar um dado problema;
- *Busca de casos*: este processo deve identificar os casos mais relevantes a um dado problema. Sua eficiência depende do mecanismo de indexação;
- *Adaptação*: este processo adapta os casos recuperados, pelo processo de busca, afim de obter uma solução para o problema dado. Normalmente as estratégias de adaptação são específicas ao domínio de aplicação do sistema;
- *Avaliação*: este processo avalia o impacto da solução antes da sua utilização. O resultado da avaliação possibilita uma correção do caso quando necessária;
- *Armazenamento*: neste processo os casos novos são armazenados na base de casos para posterior utilização.

Uma interpretação útil, para a compreensão de alguns processos acima, está ilustrada na Figura 3.1. Nela são considerados dois espaços para um determinado domínio de aplicação: um espaço para descrição dos problemas e outro para as soluções. Os processos de busca, adaptação e

armazenamento podem ser interpretados como mecanismos de exploração e modificação dos elementos destes espaços.

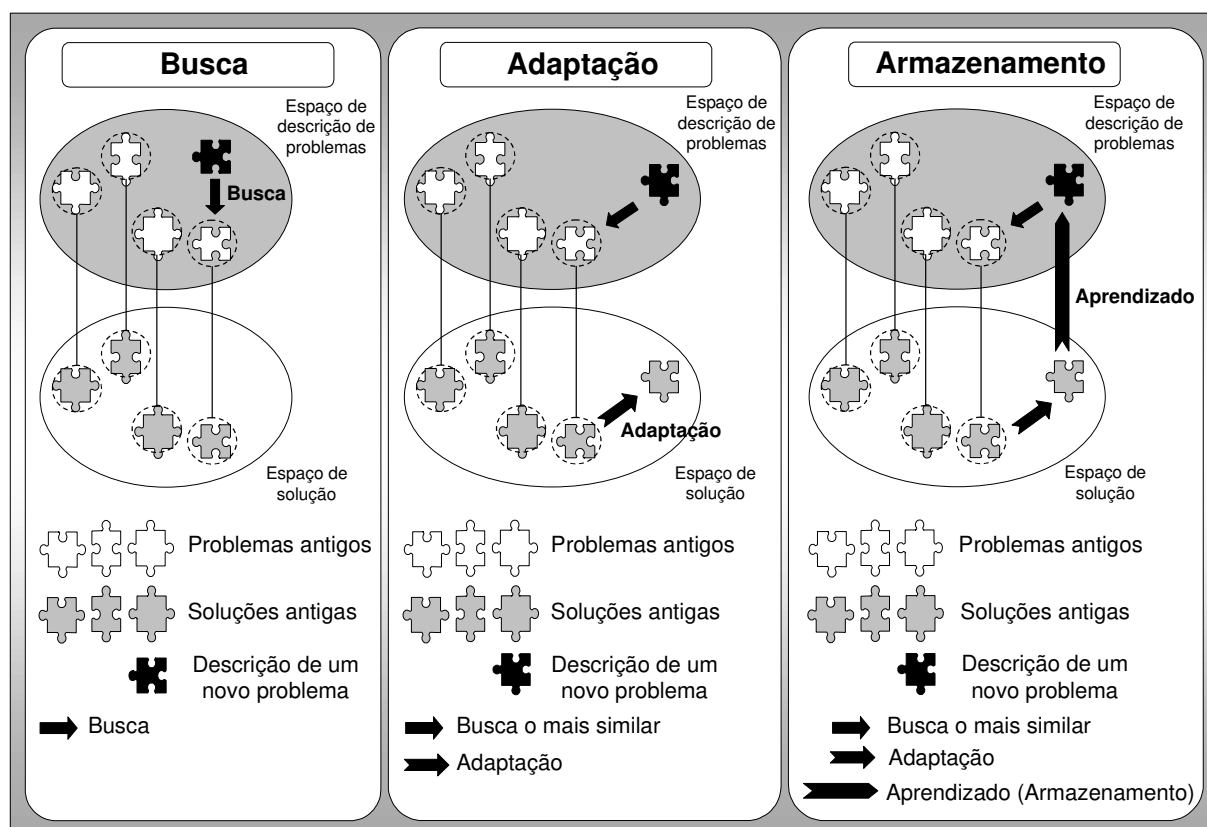


Figura 3.1: Como os processos de busca, adaptação e armazenamento atuam nos espaços de descrição de problemas e soluções. Adaptado de Leake (1996).

Na próxima seção, trataremos de uma arquitetura para um sistema baseado em casos que possa trabalhar de forma adequada no auxílio e geração do projeto de poços de petróleo.

3.2 Uma Arquitetura Baseada em Casos para Projeto de Poços

Para explorarmos os benefícios do raciocínio baseado em casos na área de projeto de poços, passamos agora a definir uma arquitetura com os principais componentes de um sistema baseado em casos. Evidentemente alguns desses componentes foram adaptados ao domínio da aplicação.

O sistema que usufrui desses componentes será denominado no decorrer deste trabalho como WellCase. A seguir, têm-se uma descrição de tais componentes e na seqüência, na Figura 3.2, uma ilustração para a arquitetura proposta com seu fluxo de atuação.

- *Base de casos*: contém casos de poços perfurados para uma posterior utilização;
- *Busca*: esse processo é encarregado de encontrar aqueles casos, armazenados na base de casos, que atendam da melhor maneira possível ao prospecto do projeto de um novo poço;
- *Adaptação*: na eventualidade de não se ter uma equivalência completa entre o prospecto e os casos encontrados pelo processo de busca, o processo adaptação toma os casos que mais satisfazem o prospecto e os utilizam na construção de novos casos de forma a atender às necessidades do projeto;
- *Armazenamento*: esses processo armazena aqueles poços que obtiveram um bom desempenho nas atividades de perfuração. É através deste armazenamento que as experiências, contidas nos casos, poderão ser utilizadas em situações futuras;
- *Esquecimento*: com o armazenamento, o número de casos pode crescer ao ponto de degradar o tempo necessário para o processo de busca identificar os casos relevantes a um dado projeto. Para este problema, o processo de esquecimento elimina aqueles casos com baixo índice de reaproveitamento.

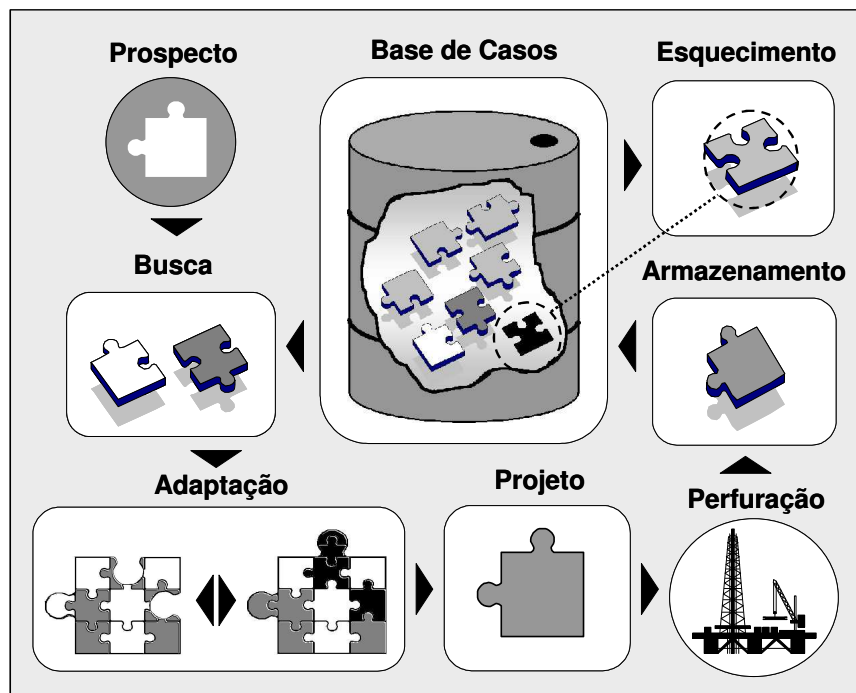


Figura 3.2: Arquitetura de um sistema baseado em casos, para auxiliar no projeto de poços de petróleo.

Como mencionado, nos próximos capítulos dedicaremos a formalização e detalhamento dos componentes da arquitetura proposta. De certa forma, procuraremos responder questões do tipo: como organizar os casos na base de casos? Como recuperar os casos relevantes ao projeto de um dado poço? Como os casos podem ser adaptados para atender às necessidades de tal projeto? Quais os casos devem ser armazenados na base de casos?

Capítulo 4

Indexação

Uma base de casos contém as experiências armazenadas na forma de casos, que são utilizadas na solução de problemas num determinado domínio de aplicação. Ela deve ser modelada de maneira a facilitar o acesso às categorias de casos relevantes a um dado problema. De uma forma geral, é a indexação que permite organizar a base de casos e, assim, caracterizar o contexto nos quais os casos podem ser aproveitados. Neste capítulo, trataremos dos atributos de indexação utilizados para organizar a base de casos do WellCase.

4.1 Base de Casos

A base de casos do WellCase foi associada a um espaço Ω onde estarão representados os casos. Uma tentativa de representar tal espaço está ilustrada na Figura 4.1⁴. Nesse espaço, o posicionamento dos casos refletirá a similaridade que eles possuem entre si, logo, quanto mais próximos estão dois casos, maior a similaridades entre eles. Quando surge a necessidade de um projeto para um poço, a base de casos deve estabelecer uma localização desse projeto no espaço

⁴ Na realidade, como se verá mais adiante, esse espaço é hiperdimensional e a Figura 4.1 é apenas uma alusão a tal espaço.

Ω . Todos os casos nas vizinhanças dessa localização serão considerados casos candidatos — os quais são investigados e identificados por um processo de Busca.

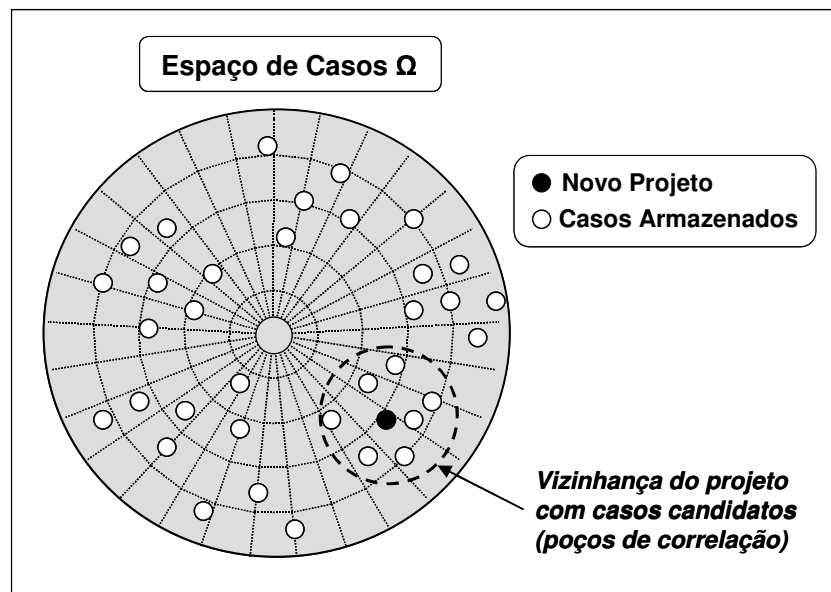


Figura 4.1: Representação espacial dos casos no espaço de casos.

Nas seções seguintes, serão introduzidos os conceitos necessários para a elaboração de um espaço Ω que represente a base de casos do WellCase. A primeira etapa dessa elaboração é a escolha dos aspectos mais relevantes que caracterizam o contexto os quais os casos podem ser aproveitados. Esses aspectos são os atributos de indexação, os quais são responsáveis pelo posicionamentos dos casos no espaço Ω .

4.2 Atributos de Indexação

Os atributos de indexação são responsáveis pela identificação dos casos no processo de busca. Eles devem caracterizar adequadamente os casos de modo a facilitar esse processo. A rigor, eles não podem ser muito específicos, pois assim dificilmente um caso seria reaproveitado. Por outro lado, se eles forem muito abrangentes, o processo de busca não seria capaz de selecionar os casos realmente importantes para uma dada situação — desta forma, deve-se procurar um equilíbrio.

Com essas ressalvas, num primeiro momento, buscou-se índices os quais permitissem a caracterização de uma “situação geológica”. Ou seja, índices relacionados com as propriedades físicas das rochas que seriam encontradas na eventual perfuração de um poço. Num segundo momento, escolheu-se índices relacionados com a forma de interação que a perfuração de tal poço teria com as rochas encontradas — evidentemente alguns índices se encaixam em ambas situações. Desta análise foram selecionados os seguintes atributos de indexação:

- Campo;
- Lâmina d’água;
- Ângulo médio de desvio⁵;
- Profundidade vertical do poço;
- Afastamento⁶;
- Azimute⁷.

Os atributos *campo*, *profundidade vertical* e *lâmina d’água* proporcionam uma delimitação geológica e, conseqüentemente, de maneira indireta, um delineamento das propriedades físicas das rochas. Por exemplo, tais atributos permitem um esboço das pressões de poro e fratura, assim como, do estado de tensões das rochas. O atributo *lâmina d’água* está ainda, associado aos avanços tecnológicos de perfuração marítima de petróleo. Quanto aos atributos *ângulo médio de desvio*, *afastamento* e *azimute*, eles estão relacionados com a trajetória do poço e, de certa forma, com a interação com as rochas. O atributo *azimute* é um bom exemplo de caracterização, tanto das propriedades físicas das rochas, como da forma de interação com tais rochas. Estudos (Santarelli *et al.*, 1996) demonstram a relação do *azimute* com problemas de estabilidade nos poços direcionais. Muitos problemas ocorrem em *azimutes* críticos, os quais estariam associados

⁵ Ângulo médio de desvio: inclinação média do poço no trecho reto, após o ganho de inclinação (*build up*). Quando houver mais de um ângulo médio de desvio para um poço, ele será indexado com a média desses valores.

⁶ Afastamento: distância horizontal entre a linha vertical que passa pela cabeça do poço e o objetivo.

⁷ Azimute: ângulo entre as direções norte e locação-objetivo medido no sentido horário.

com um estado de tensões anisotrópico. Desta forma, a classificação dos poços em relação aos seus respectivos azimutes, pode ajudar em medidas preventivas para os problemas de instabilidade em poços futuros.

Na prática observa-se que os atributos *lâmina d'água*, *ângulo médio de desvio*, *profundidade vertical*, *afastamento* e *azimute* assumem valores não numéricos como palavras ou sentenças usadas pelo engenheiro no seu cotidiano. Essa observação sugere que tais atributos sejam considerados como termos ou variáveis lingüísticas, ao invés de serem tratados como valores estritamente numéricos. Na próxima seção será exposto como tratar esses atributos com a teoria de conjuntos nebulosos.

4.3 Teoria de Conjuntos Nebulosos no Tratamento dos Atributos de Indexação

O engenheiro de perfuração utiliza associações lingüísticas para articular muitos atributos descritos na seção anterior. Por exemplo, ele frequentemente usa expressões como: poços profundos, poços de alta inclinação, grande lâmina d'água, etc. Esse tratamento é carregado de subjetividade e menos específico do que o numérico. Porém, com tal abordagem o engenheiro consegue fazer julgamentos acertados mesmo em situações complexas. Essa abordagem diminui o detalhamento de uma situação real, permitindo uma melhor compreensão dessa situação. Ou seja, a utilização de termos lingüísticos é uma forma de agregar as informações para um raciocínio mais adequado e próximo da realidade diária do engenheiro. A isso, associa-se o fato da maioria das situações reais encontradas pelo engenheiro não poderem ser descritas precisamente de uma maneira determinista dada a sua complexidade. Assim, escolheu-se usar os termos lingüísticos — utilizados pelo engenheiro de perfuração — como valores de alguns atributos de indexação ao invés de um tratamento estritamente numérico.

Para tratar os termos lingüísticos foi adotada a teoria de conjuntos nebulosos. Essa teoria oferece uma alternativa formal e rigorosa para representar o significado e capturar a incerteza associada a

esses termos. A teoria conjunto nebulosos difundiu-se no ano de 1965 com um trabalho de Zadeh (Zadeh, 1965). Sua elaboração foi motivada pela convicção que os métodos numéricos de análise eram inadequados para tratar sistemas onde a razão humana envolve o uso de variáveis cujos valores são conjuntos nebulosos. Como exemplo, têm-se os termos citados acima (poços profundos, alta inclinação, etc.) e outros também peculiares à linguagem humana: quente, morno, muito longe, etc. Com o decorrer do tempo, muitos autores têm dado sua contribuição, e isso, de certa forma, demonstra o grande interesse que a teoria tem despertado. Enfim, acreditamos que a teoria de conjuntos nebulosos seja a mais adequada e promissora para o tratamento dos termos lingüísticos.

A teoria de conjuntos nebulosos admite a possibilidade de uma pertinência parcial, diferente da noção clássica, onde há uma clara distinção dos elementos que pertencem e os que não pertencem a um dado conjunto. Logo, há uma generalização da noção clássica onde um elemento pode pertencer a um dado conjunto com um determinado grau de pertinência. Formalmente um conjunto nebuloso é definido como:

Definição: um conjunto nebuloso A é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A(x)$ que mapeia os elementos x de um espaço X para um intervalo unitário $[0,1]$, (Zadeh, 1965). Isto é:

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$$

O valor de $\mu_A(x)$ fornece o grau de pertinência — muitas vezes também chamado de grau de compatibilidade ou grau de verdade — de um elemento $x \in X$ com as propriedades de A . Esse conjunto nebuloso A pode ser representado por um conjunto de pares ordenados de elementos $x \in X$ e seus graus de pertinência, ou seja: $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$.

Como exemplo, considere “Profundo” um conjunto nebuloso cujos membros são obviamente casos de poços caracterizados por serem profundos. Os graus de pertinência são dados por uma

função $\mu_{profundo}(x) \in [0,1]$, onde x é a profundidade do poço. Tal função está representada na Figura 4.2. Nesse exemplo, um poço com uma profundidade de 2800 metros possui grau de pertinência 0,2 com a propriedade profundo. Poços com profundidades inferiores a 2500 metros não são considerados profundos — grau de pertinência nulo.

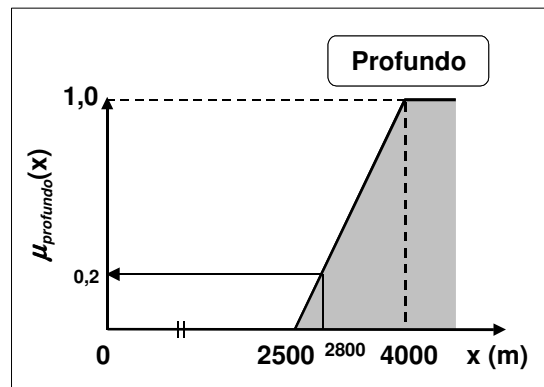


Figura 4.2: Exemplo de uma função de pertinência para o conjunto nebuloso de poços profundos.

Contudo os poços não são ditos somente profundos — profundo é um estado de um poço dentre outros. Essa observação é a base para a introdução de uma variável lingüística (Zadeh, 1975) — numa forma simplista, uma variável cujos valores são palavras em lugar de números. Dessa maneira, a profundidade pode ser interpretada como uma variável lingüística, assumindo valores como “profundo”, “não profundo”, “mais ou menos profundo”, “muito profundo”, etc. A totalidade dos valores que a variável pode assumir, os termos lingüísticos, é denotado por $T(\text{Profundidade})$. Por exemplo, definindo a variável “Profundidade” para assumir somente os valores “Raso”, “Médio” e “Profundo”, então:

$$T(\text{Profundidade}) = \{\text{Raso}, \text{Médio}, \text{Profundo}\}$$

Numa observação mais criteriosa, verificamos que os termos de $T(\text{Profundidade})$ são símbolos e representam os valores nos quais a variável “Profundidade” pode assumir. Os conjuntos nebulosos são empregados para descrever matematicamente esses símbolos, criando uma ponte

para um processamento numérico. Por exemplo, os termos de $T(\text{Profundidade})$ foram representados pelos conjuntos nebulosos caracterizados pelas funções de pertinência mostradas na Figura 4.3.

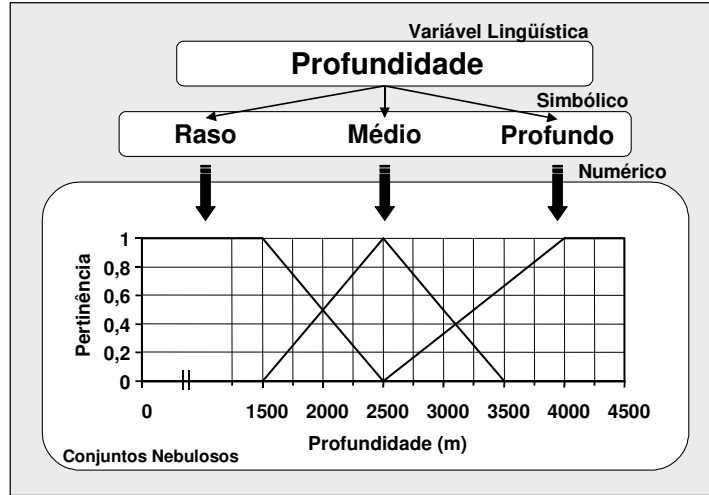


Figura 4.3: Variável linguística Profundidade.

A construção dos termos $T(\text{Profundidade})$ pode ser feita pela sensibilidade do engenheiro de perfuração. Uma outra maneira é a aplicação de modificadores linguísticos a um subconjunto mínimo de $T(\text{Profundidade})$ pré-definido. Esses modificadores alteram a forma do subconjunto mínimo, produzindo novos conjuntos nebulosos. Por exemplo, pode-se usar “Profundo” como um termo primário e, aplicando os modificadores linguísticos “não”, “mais ou menos” e “muito”, modificar o significado desses termos, construindo assim novos termos. Os modelos matemáticos mais frequentemente usados para esses modificadores são apresentados a seguir. Outros exemplos de modificadores linguísticos podem ser encontrados em Pedrycz & Gomide (1998).

$$\mu_{\text{não}(A)}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.1)$$

$$\mu_{\text{mais-ou-menos}(A)}(x) = (\mu_A(x))^{1/2} \quad (4.2)$$

$$\mu_{\text{muito}(A)}(x) = (\mu_A(x))^2 \quad (4.3)$$

Neste trabalho, para a definição dos termos das variáveis lingüísticas, bem como suas funções de pertinência, optou-se pela sensibilidade do engenheiro, ao invés de modificadores lingüísticos. O fato é que tal sensibilidade também é uma fonte de conhecimento especialista a qual deve ser considerada. Dos atributos de indexação apresentados na seção anterior, os que assumem valores numéricos — lâmina d'água, ângulo médio de desvio, profundidade vertical do poço, afastamento e azimuth — serão tratados como variáveis lingüísticas. Os termos associados a estas variáveis estão definidos pelos conjuntos nebulosos da Figura 4.4.

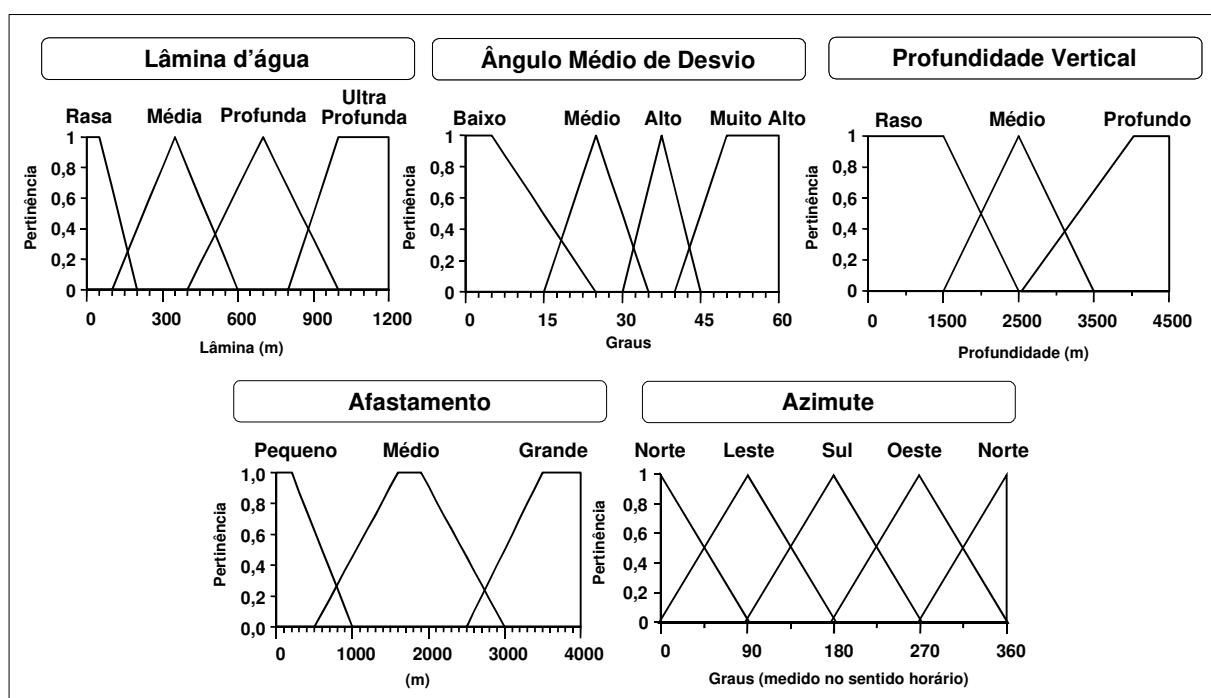


Figura 4.4: Atributos de indexação tratados como variáveis lingüísticas.

Quanto à implementação dessas variáveis, o sistema — nomeado de WellCase — prevê facilidades de edição e inclusão de novas variáveis de acordo com a experiência de cada especialista e características inerentes de cada região. Muitas vezes o avanço tecnológico permite também incorporar novos parâmetros.

4.4 Espaço Nebuloso de Casos

Uma vez definidos os atributos de indexação e a forma de tratá-los através da teoria de conjuntos nebulosos, estamos aptos a construir um espaço nebuloso de casos (Mendes^(a) *et al.*, 2001). Na sua construção, será utilizada a interpretação geométrica de conjuntos nebulosos — a qual foi apresentada primeiramente por Zadeh (1971) e retomada por Kosko (1992, 1997).

Na construção desse espaço, a princípio, considerou-se numa forma genérica, um conjunto de atributos de indexação $\{atributo_1, atributo_2, \dots, atributo_N\}$ que assumem valores numéricos. Adotou-se u_i como o valor numérico do $atributo_i$ com u_i pertencendo ao universo U_i . Numa abordagem tradicional, os casos em um espaço $S = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_N$ podem ser representados pelo vetor $(u_1, u_2, \dots, u_N)$ e o processo de busca realizado em tal espaço. No entanto, pelas razões discutidas na seção anterior, assumiu-se que tais atributos são melhor descritos como variáveis lingüísticas e possuem como valores os seguintes termos lingüísticos:

$$\begin{aligned} T(Atributo_1) &= \{T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1m(1)}\}; \\ T(Atributo_2) &= \{T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2m(2)}\}; \\ &\vdots \\ T(Atributo_N) &= \{T_{N1}, T_{N2}, \dots, T_{Nm(N)}\}; \end{aligned}$$

Onde:

T_{ij} : nome do conjunto nebuloso descrito por uma função de pertinência $\mu_{ij}(u_i)$;

i : indica a variável lingüística — $Atributo_i$;

j : indica o termo da variável lingüística i ;

$m(i)$: é o número de termos da variável lingüística i .

Para cada $Atributo_i$ uma função $F_i : U_i \rightarrow [0,1]^{m(i)}$ pode ser definida, tal que, para qualquer $u_i \in U_i$,

$$F_i(u_i) = (\mu_{i1}(u_i), \mu_{i2}(u_i), \dots, \mu_{im(i)}(u_i)) . \quad (4.4)$$

De maneira análoga, uma outra função $F : U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \rightarrow [0,1]^n$ pode ser definida:

$$F(u_1, u_2, \dots, u_N) = (F_1(u_1), F_2(u_2), \dots, F_N(u_N)) \quad (4.5)$$

Se os F_i 's são introduzidos na função F — Equação 4.5 —, temos:

$$F(u_1, u_2, \dots, u_N) = (\mu_{11}(u_1), \mu_{12}(u_1), \dots, \mu_{1m(1)}(u_1), \mu_{21}(u_2), \mu_{22}(u_2), \dots, \mu_{2m(2)}(u_2), \dots, \mu_{N1}(u_N), \mu_{N2}(u_N), \dots, \mu_{Nm(N)}(u_N)) \quad (4.6)$$

Tal função F permite mapear os casos do espaço S — espaço no qual os atributos de indexação assumem valores numéricos — para um hipercubo n -dimensional unitário nebuloso, o qual foi chamado de espaço nebuloso de casos Ω . Em termos matemáticos, tem-se um mapeamento $F : S \rightarrow \Omega$. No espaço Ω , um caso pode ser interpretado como conjunto nebuloso ordenado (Sadegh-Zadeh, 2000) e, geometricamente, representado por um ponto. O número de dimensões do espaço irá depender do números de termos lingüísticos definidos para cada atributo. Ou seja, do número de funções $\mu_{ij}(u_i) : U_i \rightarrow [0,1]$. Esse número é dado por $n = \sum_{i=1}^N m(i)$ e relaciona-se com a inserção de um conhecimento especialista nas informações dadas pelos atributos de indexação. Conhecimento este representado nos termos das variáveis lingüísticas e suas funções de pertinência. Introduzindo agora os atributos de indexação definidos nas duas seções prévias — exceto o atributo campo o qual não foi tratado com a teoria de conjunto nebulosos — obtém-se a seguinte função F :

$$F(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) = (\mu_{11}(u_1), \mu_{12}(u_1), \mu_{13}(u_1), \mu_{14}(u_1), \mu_{21}(u_2), \mu_{22}(u_2), \mu_{23}(u_2), \mu_{24}(u_2), \mu_{31}(u_3), \mu_{32}(u_3), \mu_{33}(u_3), \mu_{41}(u_4), \mu_{42}(u_4), \mu_{43}(u_4), \mu_{51}(u_5), \mu_{52}(u_5), \mu_{53}(u_5), \mu_{54}(u_5)) \quad (4.7)$$

Onde u_1, u_2, u_3, u_4 e u_5 referem-se respectivamente aos valores numéricos de lâmina d'água, ângulo médio de desvio, profundidade vertical, afastamento e azimuth. Quanto às funções $\mu_{ij}(u_i)$, elas são as funções de pertinência dos conjuntos nebulosos associados às variáveis lingüísticas definidas na Figura 4.4 — veja a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Notação para as funções de pertinência dos conjuntos nebulosos da Figura 4.4.

Atributos	Termos	Funções de Pertinência
Lâmina d'água	Rasa	$\mu_{11}(u_1)$
	Média	$\mu_{12}(u_1)$
	Profunda	$\mu_{13}(u_1)$
	Ultra Profunda	$\mu_{14}(u_1)$
Ângulo médio de desvio	Baixo	$\mu_{21}(u_2)$
	Médio	$\mu_{22}(u_2)$
	Alto	$\mu_{23}(u_2)$
	Muito Alto	$\mu_{24}(u_2)$
Profundidade vertical	Raso	$\mu_{31}(u_3)$
	Médio	$\mu_{32}(u_3)$
	Profundo	$\mu_{33}(u_3)$
Afastamento	Pequeno	$\mu_{41}(u_4)$
	Médio	$\mu_{42}(u_4)$
	Grande	$\mu_{43}(u_4)$
Azimuth	Norte	$\mu_{51}(u_5)$
	Leste	$\mu_{52}(u_5)$
	Sul	$\mu_{53}(u_5)$
	Oeste	$\mu_{54}(u_5)$

Desta forma, no espaço Ω , um caso será representado por uma 18-upla ordenada de valores de pertinência. Note que numa situação mais geral alguns atributos podem não serem descritos por

funções de pertinência. Nesse desenvolvimento, insere-se o caso do atributo campo. Tal situação sugere definir um espaço Ω relativo a cada campo. Para facilitar a compreensão, considere o exemplo numérico ilustrado na Figura 4.5.

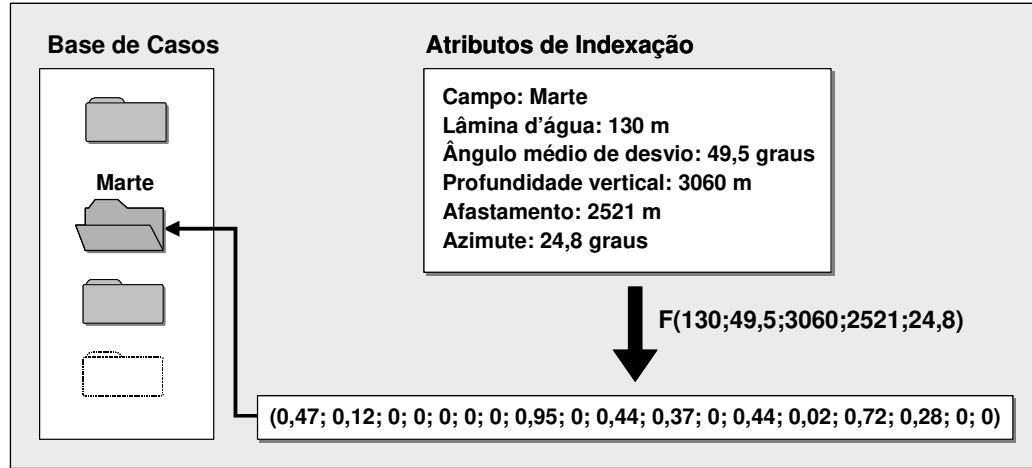


Figura 4.5: Exemplo numérico do processo de indexação de um caso na base de casos.

Neste exemplo — Figura 4.5 —, o caso pode ser representado no espaço S pela 5-upla ordenada $(130; 49,5; 3060; 2521; 24,8)$. De acordo com a discussão prévia, aplicando a função F , tem-se o seguinte mapeamento para o espaço Ω :

$$(130; 49,5; 3060; 2521; 24,8) \xrightarrow{F} (0,47; 0,12; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0,95; 0; 0,44; 0,37; 0; 0,44; 0,02; 0,72; 0,28; 0; 0)$$

Geometricamente, esta 18-upla ordenada corresponde a um ponto no espaço Ω definido para o campo de Marte — afim de facilitar a visualização um outro exemplo em três dimensões está ilustrado na Figura 4.6. No entanto, o atributo campo possui um papel importante no processo busca, assim, é conveniente definir uma função mais geral a qual inclua tal atributo:

$$G(v, u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) = (v, F(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)) \quad (4.8)$$

Onde v refere-se ao valor do atributo campo. Assim, o caso passa a ser indexado por uma 19-upla ordenada de valores.

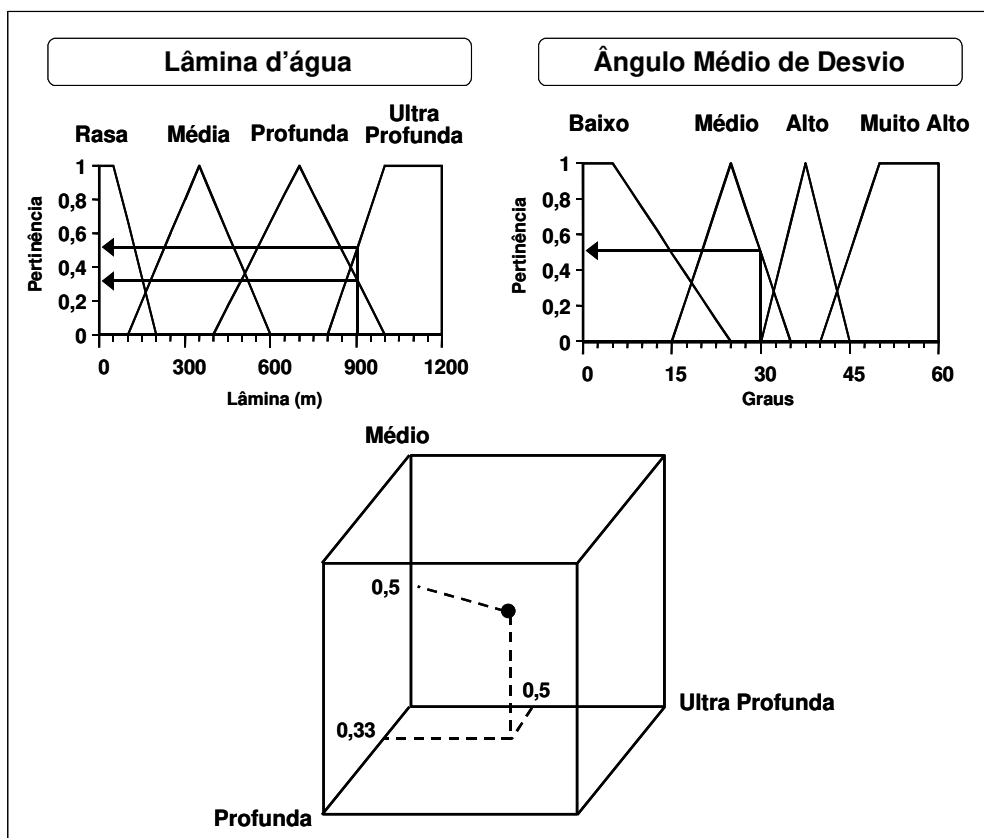


Figura 4.6: Ilustração geométrica em três dimensões de um caso com 900 metros de lâmina d'água e 30 graus de ângulo médio de desvio. Este caso é representado no espaço Ω por um ponto.

Até o momento, tratamos o espaço de casos e a representação dos casos nesse espaço. Não nos preocupamos em expor a formulação do caso em si. Na próxima seção, será exposto como um caso é composto e como suas informações podem ser estruturadas.

4.5 Os Casos

Os casos são poços perfurados anteriormente que tiveram um bom desempenho na sua execução. Assumiu-se que muitos problemas de projeto e/ou perfuração foram resolvidos ou evitados — o **Capítulo 7** tratará a respeito de como avaliar o desempenho dos poços. Quando se elabora um projeto de poço, deseja-se reaproveitar as soluções de casos anteriores. No entanto, uma das dificuldades que surge é como estabelecer um formato adequado para representar tais casos. Esse formato deve proporcionar consistência e estruturação às informações contidas nos casos, evitando falhas de digitação e perda de conhecimento. Em vista disso, escolhemos os *frames*⁸ como formalismo para representação dos casos. Esse formalismo possui uma estrutura de hierarquias a qual permite fazer descrições de situações complexas e mecanismos para garantir a consistência do dados.

Os *frames* surgiram inicialmente no trabalho de Minsky (1975). Sua estrutura é composta por *slots* — escaninhos — com valores associados descrevendo alguma propriedade de um objeto. Muitas vezes os valores desses *slots* podem ser descritos por outros *frames*, criando um sistema de *frames* conectados entre si. Essa característica permite a um *frame* mais especializado herdar propriedades de outro mais geral, ou seja, existe um mecanismo de herança. Associado a cada *slot* existem informações — denominadas de facetas — as quais definem o tratamento desse *slot*. Como por exemplo, os valores que ele pode assumir ou procedimentos para calculá-lo. A Figura 4.7(a) ilustra dois *frames* genéricos, onde o arco direcionado indica uma herança hierárquica de tal forma que o *frame* da direita, mais especializado, herde propriedades de um *frame* mais geral, o da esquerda. O *frame* mais especializado é denominado de subclasse e o *frame* mais geral de superclasse. Na Figura 4.7(b), apresentamos um exemplo resumido, onde cada *slot* representa um

⁸ Neste trabalho, adotou-se o termo original inglês, *frame*, por ser o mais usual para denominar este tipo de estrutura. Algumas traduções como quadro, esquema e moldura são menos comuns, prevalecendo o original. Pelas mesmas razões, adotou-se também o termo *slot*.

atributo de um poço — observe as facetas, elas são muito úteis na verificação da consistência das informações.

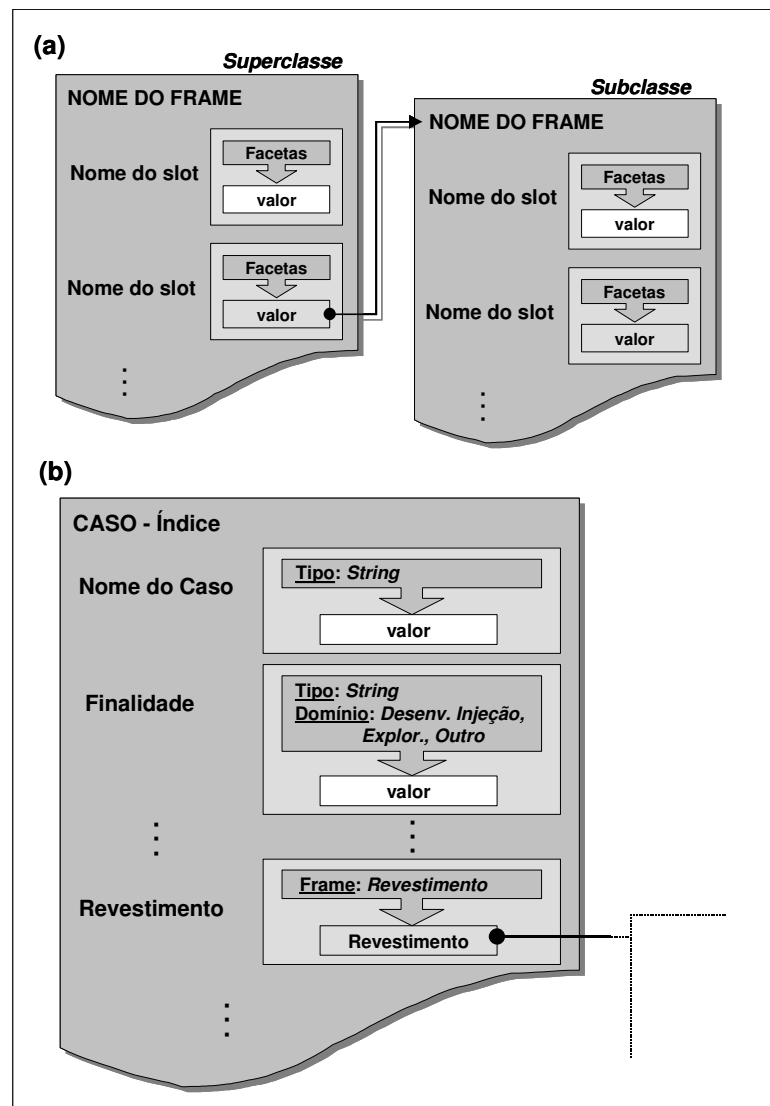


Figura 4.7: (a) Representação de dois *frames* genéricos com herança hierárquica. (b) Representação resumida de um *frame* Caso.

Para modelar um sistema de *frames* que represente os casos de poços, é necessário definir qual a estrutura hierárquica a ser utilizada. Essa estrutura é construída classificando-se as informações do poço em subclasses e superclasses, uma espécie de taxionomia. Tal tarefa deve ser realizada

de maneira cuidadosa, pois determinará a herança das propriedades entre as classes. Assim, a Figura 4.8 representa um exemplo de como tal estruturação pode ser feita.

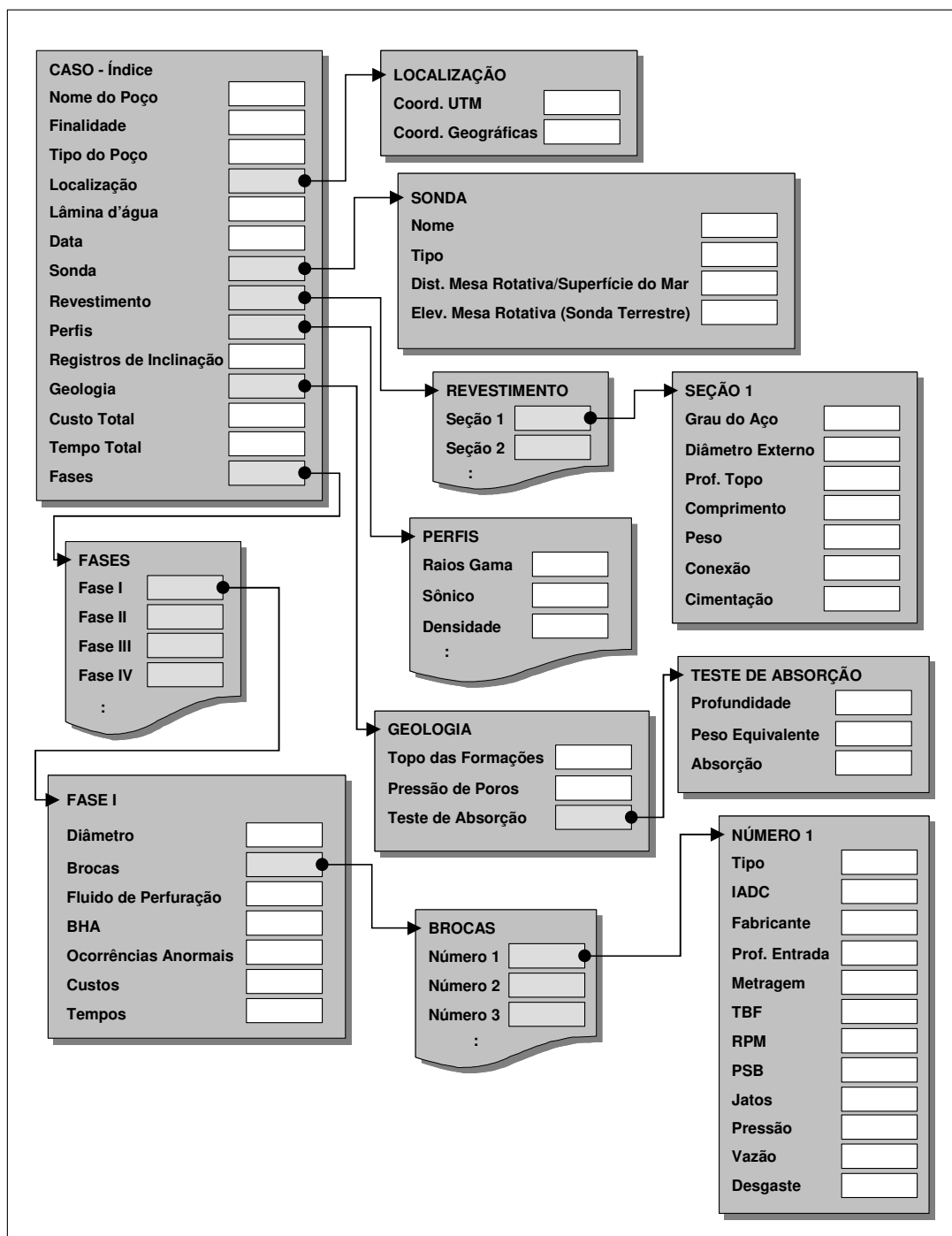


Figura 4.8: Sistema de *frames* utilizado na representação dos casos.

Observe que procurou-se colocar informações mais gerais no *frame* Caso, tal como o nome do poço e sua localização. Informações mais específicas estão direcionadas para outros *frames*. Assim sendo, para a descrição da seção de uma coluna de revestimento, o *frame* Seção possui *slots* que definem o grau do aço, diâmetro externo da seção, comprimento da seção, etc. O *frame* Seção, por sua vez, está ligado a classes mais gerais — como o *frame* Revestimento que define qual seção está se tratando. Outra observação é que associado a cada *slot* existem facetas as quais definem os valores que o *slot* pode assumir. Por exemplo, o *slot* Finalidade — do *frame* Caso — possui uma faceta que indica o tipo de dado — string — e outra que indica o domínio — desenvolvimento, exploratório, injeção, outro. Logo, as facetas permitem garantir a coerência das informações.

Em suma, o *frame* é um formalismo de representação do conhecimento bastante apropriado na representação dos casos. Em algumas situações precisamos considerar um caso como uma entidade independente. Em outras, considerar detalhes de sua estrutura interna. Por exemplo, como veremos em capítulos mais adiante, um projeto novo pode ser criado a partir de partes de outros casos. Nesta situação é desejável considerar informações específicas estruturadas internamente. Numa outra situação, no processo de busca, os casos são interpretados como unidades independentes.

Capítulo 5

Busca

O processo de busca é responsável em identificar os casos mais adequados na construção do projeto para um novo poço. Para isso, tal processo deve ser capaz de “reconhecer” o quanto um caso se assemelha ao novo projeto. Tal “reconhecimento” pode ser realizado com a noção de distância — medida no espaço Ω . Neste capítulo, vamos estabelecer uma medida de similaridade com o auxílio da noção de distância. Isto vai permitir ao processo de busca identificar os casos com potencialidade de serem reaproveitados.

5.1 Cálculo de Similaridades

Na abordagem adotada, a noção de similaridade foi construída com a ajuda do conceito de distância de conjuntos nebulosos. Mais explicitamente, utilizou-se a noção de dissimilaridade de conjuntos nebulosos como sinônimo de distância. Esse conceito foi aplicado aos casos, uma vez que nós os exprimimos como conjuntos nebulosos e os representamos por pontos no espaço Ω —

Capítulo 4. Em geral, a distância entre dois conjuntos nebulosos $A = (a_1, \dots, a_n)$ e

$B = (b_1, \dots, b_n)$, pertencentes ao mesmo universo, pode ser definida pela distância⁹ de Minkowski:

$$d(A, B) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{1/p}, \text{ onde } p \geq 1 \quad (5.1)$$

Para alguns valores específicos de p temos distâncias bastante conhecidas, como por exemplo, a distância Euclidiana largamente utilizada na Física Clássica e a distância de Hamming muito comum em problemas computacionais:

- $p=2$, fornece a distância Euclidiana: $d(A, B) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^2 \right)^{1/2}$;
- $p=1$, fornece a distância de Hamming: $d(A, B) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|$.

Do ponto de vista da matemática, similaridade e distância são equivalentes. Essa percepção é útil para exprimir a similaridade entre dois conjuntos nebulosos. Logo, dado dois conjuntos nebulosos A e B podemos expressar a similaridade entre eles por meio do complemento de sua distância: $\text{Similaridade}(A, B) = 1 - d(A, B)$. Neste trabalho, adotou-se, por simplificação, a distância de Hamming mais um fator de normalização no denominador — pois estamos interessados em um resultado no intervalo $[0, 1]$:

$$\text{Similaridade}(A, B) = 1 - \frac{d(A, B)}{d(A \cup B, \emptyset)} \quad (5.2)$$

⁹ O conceito de distância não deve ser usado indiscriminadamente. Formalmente a distância no espaço Ω é uma função binária que para x, y e $z \in \Omega$ satisfaz:

1. $d(x, y) \geq 0$; 2. $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$; 3. $d(x, y) = d(y, x)$;
Se adicionalmente ela satisfizer:
4. $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$;

Então d será uma métrica do espaço Ω . Condição que nem sempre é requerida.

O fator de normalização — $d(A \cup B, \emptyset)$ — faz uso do conceito de união de conjuntos nebulosos. Essa operação é convenientemente representada tomando-se o máximo dos correspondentes graus de pertinência dos conjuntos:

$$A \cup B = (\max(a_1, b_1), \dots, \max(a_n, b_n)) \quad (5.3)$$

Como exemplo de cálculo da similaridade, considere os conjuntos nebulosos: $A_k = (0,3; 0,7)$ e $A_j = (0,9; 0,2)$. Na Figura 5.1, representou-se estes conjuntos num cubo bidimensional unitário e calculou-se a similaridade entre eles com a Equação 5.2.

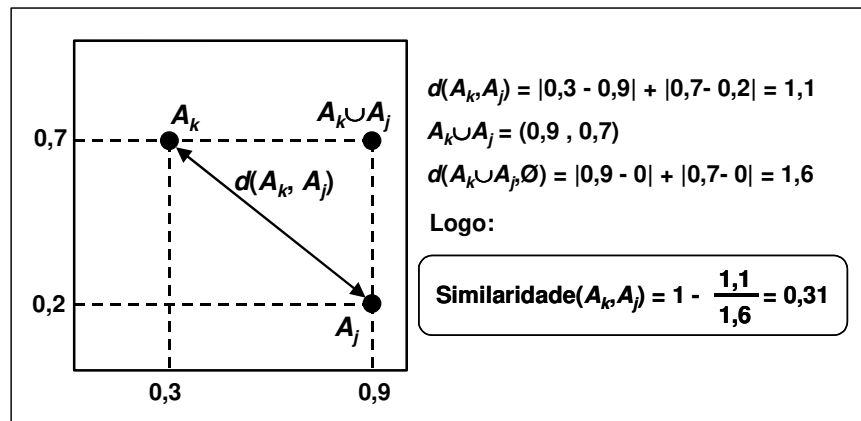


Figura 5.1: Exemplo de cálculo da similaridade entre dois conjuntos nebulosos.

A Equação 5.2 considera que todas as dimensões têm a mesma importância. Na prática, não é o que ocorre. Sabe-se que algumas dimensões são mais importantes que outras, ou seja, alguns atributos possuem uma relevância maior no processo de busca. Logo, para o cálculo da similaridade ficar mais realista, é conveniente ponderar as dimensões do hipercubo de acordo com a importância de cada atributo. Numa interpretação geométrica, cada atributo está associado a um subespaço do hipercubo, sendo que, cada subespaço possui um peso para o cálculo da similaridade. Matematicamente, a expressão para o cálculo da similaridade entre dois conjuntos nebulosos $A = (a_1, \dots, a_n)$ e $B = (b_1, \dots, b_n)$ torna-se:

$$\text{Similaridade}(A, B) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot |a_i - b_i|}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \max(a_i, b_i)} \quad (5.4)$$

Onde: w_i é peso associado a dimensão i .

Numa forma mais compacta, para facilitar os cálculos, a Equação 5.4 pode ser rescrita como:

$$\text{Similaridade}(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \min(a_i, b_i)}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \max(a_i, b_i)} \quad (5.5)$$

No entanto, conforme tratado no **Capítulo 4**, um caso será indexado por uma 19-upla ordenada de valores — onde o primeiro é o nome do campo ao qual o caso pertence e o demais são os valores de pertinências correspondentes aos atributos de indexação tratados como variáveis lingüísticas. Para que se possa considerar o valor referente ao atributo campo no cálculo da similaridade é proposta a seguinte alteração da Equação 5.5:

$$\text{Similaridade}(A, B) = \frac{w_1 \cdot \Gamma(a_1, b_1) + \sum_{i=2}^{19} w_i \cdot \min(a_i, b_i)}{w_1 \cdot \Gamma(a_1, b_1) + \sum_{i=2}^{19} w_i \cdot \max(a_i, b_i)} \quad (5.6)$$

Onde a_1 e b_1 são os nomes dos campos aos quais pertencem os caso A e B respectivamente e a função $\Gamma(a_1, b_1)$ é definida como:

$$\Gamma(a_1, b_1) = \begin{cases} 1 & \text{se } a_1 = b_1 \\ 0 & \text{se } a_1 \neq b_1 \end{cases} \quad (5.7)$$

A Equação 5.6 é empregada para avaliar a similaridade entre caso–projeto, mas também pode ser usada para caso–caso ou projeto–projeto, uma vez que todos eles são passíveis de representação no espaço Ω . Para um maior aprofundamento a respeito de similaridade de conjuntos nebulosos sugerimos, além do trabalho de Kosko (1992), o trabalho de Sadegh-Zadeh^(a) (1999).

5.2 Região de Casos Similares

Com a Equação 5.6 pode-se selecionar uma região no espaço Ω com casos que se assemelham ao projeto. Basicamente, o processo de busca estabelece uma posição nesse espaço para tal projeto. O posicionamento do projeto é relativamente simples, uma vez que, pode-se representá-lo por uma n -upla ordenada de valores de pertinência da mesma maneira que se representou os casos. Para estabelecer uma vizinhança ao projeto, vamos introduzir o conceito de esfera de similaridade (Sadegh-Zadeh^(b), 1999).

Definição: dado um ponto $A_i \in \Omega$ e um valor de similaridade δ , uma esfera de raio $r = 1 - \delta$ centrada no ponto A_i , denotada por $S_\delta(A_i)$, pode ser definida como:

$$S_\delta(A_i) = \{A_j \mid \text{Similaridade}(A_i, A_j) \geq \delta\}$$

Deste modo, para cada projeto pode-se construir uma esfera no espaço Ω — de raio definido de acordo com uma similaridade mínima requerida δ — centrada no ponto que representa tal projeto. Quando mudamos o projeto ou δ é gerada uma nova esfera. Os casos similares ao projeto estarão no interior dessa esfera. Como ilustração geométrica, recorreu-se a um exemplo bidimensional apresentado na Figura 5.2. Nela está representada o conjunto nebuloso $A_k = (0,6; 0,5)$ e uma

esfera¹⁰ de similaridade com $\delta = 0,6$; onde a primeira dimensão possui o dobro da importância da segunda.

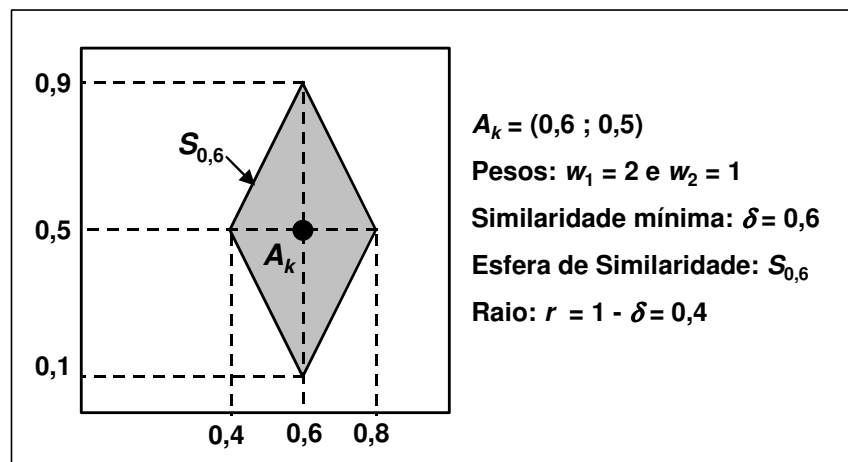


Figura 5.2: Exemplo de esfera de similaridade.

É importante enfatizar que a esfera¹¹ de similaridade é criada de acordo com o projeto que se tem em mãos. Esta abordagem permite um melhor mapeamento do espaço, visto que baseia-se nas propriedades do próprio projeto.

5.3 Identificação dos Casos Promissores

Para a identificação dos casos mais promissores ao projeto de um novo poço, o processo de busca é realizado em dois níveis:

¹⁰ Se estivéssemos trabalhando com a distância Euclidiana, a esfera de similaridade da Figura 5.2 seria um círculo deformado pela ponderação — uma elipse. Como estamos trabalhando com uma distância não-Euclidiana, talvez o quadrilátero pareça um pouco estranho ao senso comum de esfera.

¹¹ Também pode-se interpretar a esfera de similaridade como uma classe de casos similares a qual o projeto é membro, mas não qualquer membro, pois a esfera está centrada nele. A noção de distância, da qual extraímos a função de similaridade, pode ser vista como um indicativo do “instanciamento” dos casos à classe. Por esse ponto de vista, a classe também pode ser interpretada como um conjunto nebuloso, e a expressão de similaridade como sua função de pertinência.

- Primeiro nível: seleciona-se uma região do espaço Ω com casos similares ao projeto — esfera de similaridade. Os casos contidos nesta região são considerados casos candidatos;
- Segundo nível: os casos candidatos são analisados mais detalhadamente, para se escolher o mais promissor ou um conjunto de casos promissores.

Para se determinar quais dos casos contidos no interior da esfera de similaridade são mais promissores, é necessário um conhecimento mais apurado. Quando escolhemos os atributos de indexação, levamos em consideração aspectos gerais. Isso foi necessário porque um caso apresenta um grande número de aspectos que o representam e o processo de busca não pode analisar todos eles, pois o tempo despendido seria muito grande. Podemos dizer que os atributos de indexação promovem uma relação “inter casos–projeto”. Agora, quando cria-se uma esfera de similaridade para um dado projeto, e, conseqüentemente, defini-se um espaço de busca menor, precisa-se de uma relação “intra casos–projeto”, para se determinar os casos mais promissores. Por essa razão — para explorar os casos no interior da esfera de similaridade — utilizou-se similaridades mais pormenorizadas as quais denominamos de similaridades específicas:

- *Similaridade de lâmina d’água*: essa similaridade compara as lâminas d’água do caso e o poço projeto — através da diferença da profundidade destas lâminas;
- *Similaridade de ângulo médio de desvio*: compara os ângulos médio de desvio do caso e o projeto — através da diferença desses ângulos;
- *Similaridade de profundidade vertical*: compara as profundidades verticais do caso e o projeto — pela diferença dessas profundidades;
- *Similaridade de afastamento*: compara os afastamentos — quando forem poços direcionais — do caso e o projeto — através da diferença desses afastamentos;
- *Similaridade de distância*: compara a distância entre o caso e o projeto — através de suas coordenadas (UTM¹² ou geográficas);

¹² UTM: abreviatura de *Universal Transversa de Mercator*.

- *Similaridade de formação*: compara as formações que estão presente no caso e as que são previstas para o projeto;
- *Similaridade de topo das formações*: compara os topos das formações comuns no caso e projeto — através da diferença média de profundidade vertical desses topos;
- *Similaridade de espessura das formações*: compara a espessura das formações comuns no caso e no projeto — através da diferença média dessas espessuras;
- *Similaridade de azimuth*: compara os azimuths entre o caso e o projeto — através da diferença desses azimuths.

Novamente, fizemos uso da teoria de conjuntos nebulosos para tratar das similaridades específicas. A aplicação desse recurso é apropriada, visto que a idéia de similaridade também é um conceito aproximado e subjetivo. Em adição, é simples modificar as funções de pertinência conforme a experiência do especialista, ou mesmo a inclusão de outras similaridades específicas. Na Figura 5.3 estão definidas as funções de pertinência dessas similaridades. Note que elas foram tratadas como conjuntos nebulosos individuais e não como variáveis lingüísticas. O tratamento com variáveis lingüísticas também seria possível, entretanto estaríamos mapeando o espaço nos termos dessas variáveis. Como estamos interessados numa relação mais específica entre caso–projeto, foi considerado mais apropriado representar cada similaridade específica como um único conjunto nebuloso.

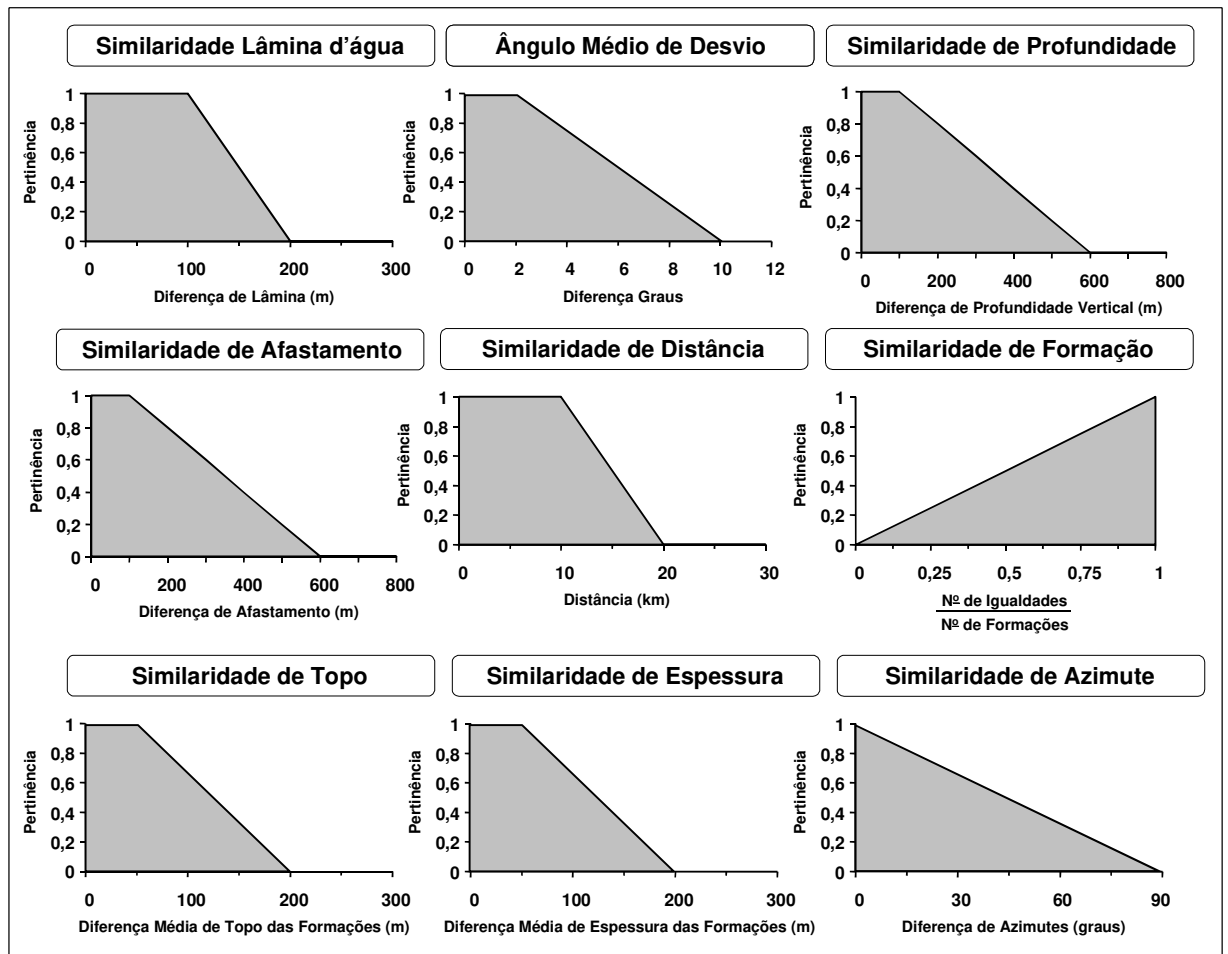


Figura 5.3: Funções de pertinência dos atributos de similaridade utilizados na investigação do interior da esfera de similaridade.

As similaridades específicas permitem refinar a medida de similaridade dada pelos atributos de indexação — primeiro nível. Para isso, vamos compor todas as similaridades específicas numa única medida similaridade — a qual denominaremos de similaridade total. O cálculo desta similaridade será realizado com a Equação 5.5, considerando agora $A = (a_1, \dots, a_n)$ um conjunto de graus de pertinência definidos pelas funções da Figura 5.3 e $B = (1, \dots, 1)$ um vetor unitário. Matematicamente, temos:

$$Similaridade\ Total(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \min(a_i, 1)}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \max(a_i, 1)} \quad (5.7)$$

Como $a_i \leq 1$, podemos nesta situação simplificar a Equação 5.7:

$$Similaridade\ Total = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5.8)$$

Logo o cálculo da similaridade total torna-se uma média do valores de pertinência — dados pelos atributos da Figura 5.3 — ponderada pela importância de cada atributo. Essa similaridade é conveniente para investigar os casos no interior da esfera de similaridade.

Capítulo 6

Adaptação

Na elaboração do projeto de um poço, dificilmente um único caso recuperado pelo processo de busca reúne todas as soluções e informações desejadas ao projeto de tal poço. Normalmente, são necessários vários casos para atender por completo as necessidades desse projeto. Além disso, é necessário adaptar as soluções provenientes dos casos recuperados para que possam ser aplicadas. Neste capítulo, abordaremos a questão da adaptação. Especificamente, discutiremos como identificar as informações mais importantes, contidas nos casos, com relação a um dado projeto. Posteriormente, proporemos uma abordagem evolutiva¹³, para aproveitar tais informações na composição de novos casos. Ao final do capítulo, focaremos nossa discussão na questão do dimensionamento do projeto aproveitando esses novos casos.

6.1 Relevância dos Poços Recuperados pelo Processo de Busca

O processo de busca é um mecanismo que fornece alternativas de projetos — expressos nos casos — para a elaboração do projeto de um novo poço. No entanto a “efetividade” de aproveitamento

¹³ As principais abordagens evolutivas propostas na literatura são os algoritmos genéticos, estratégias evolutivas e programação evolutiva. Todas essas abordagens apresentam o mesmo princípio básico, aplicam elementos da teoria da evolução natural, para solução de problemas a partir de sua implementação em computador.

de uma ou algumas dessas alternativas não depende somente da medida de similaridade — definida no capítulo anterior. Podem haver casos — apresentando boa similaridade com o cenário esperado para o projeto de um novo poço, mas não necessariamente trazendo as melhores informações. Dentre esses casos, podem existir aqueles menos similares com informações mais adequadas ao projeto — principalmente informações de cunho tecnológico. A adequação a qual nos referimos seria uma medida que buscaria expressar a “efetividade” ou ainda a “potencialidade” de utilização das informações contidas em um caso com relação a um dado projeto. Logo, quanto maior essa “efetividade”, mais atrativo se tornaria tal caso. Denominaremos essa medida de relevância. Para o seu cálculo, a princípio foram selecionados 4 parâmetros:

- Idade do poço;
- Severidade nas anormalidades¹⁴;
- Taxa de penetração total do poço;
- Similaridade total.

O parâmetro idade do poço investigaria se o poço não estaria tecnologicamente ultrapassado; pois devido aos constantes aperfeiçoamentos nos projetos de poços numa dada região, não seria desejável a reutilização de poços muitos antigos para novos projetos. Mais especificamente, o interesse incide sobre os poços recentes. O julgamento de quanto um poço é recente é um tanto subjetivo e a abordagem mais apropriada é com o uso da teoria de conjuntos nebulosos. Assim sendo, poços recentes foram tratados como um conjunto nebuloso onde sua função de pertinência está representada na Figura 6.1. O segundo parâmetro visa privilegiar os poços que apresentam ocorrências anormais menos severas. De maneira similar ao primeiro parâmetro, poços com baixa severidade nas anormalidades também foram modelados por um conjunto nebuloso. A função de pertinência de tal conjunto está representada na Figura 6.1.

¹⁴ Anormalidade: qualquer evento, não rotineiro, que atrase ou impeça a conclusão de um poço. Por exemplo, perda de circulação, encerramento da broca, prisão de coluna, etc.

Destacamos que a medida proposta para a severidade é uma aproximação grosseira do ideal, no entanto, para uma primeira abordagem, ela é satisfatória. Sugerimos estudos mais aprofundados para analisar os diversos tipos de anormalidades individualmente. Desta forma, seria possível não somente refinar a medida de severidade, mas também identificar e avaliar melhor as causas e as recorrências de tais anormalidades em projetos futuros. O terceiro parâmetro, a taxa de penetração, é uma variável intimamente relacionada com o desempenho da perfuração e um indicativo do custo de tal poço. Ressaltamos que a comparação direta de custos nem sempre fornece resultados coerentes devido à variação de preços — principalmente aluguel de sonda e materiais. Esse parâmetro também foi descrito por um conjunto nebuloso — Figura 6.1. Observe que os valores T_1 e T_2 do gráfico da função de pertinência não foram definidos. Esses valores dependem do pessoal da sonda e da região de perfuração, logo é mais adequado que eles sejam definidos para cada região. Por fim, o último parâmetro, a similaridade total — definida no **Capítulo 5** —, permite investigar se o caso possui condições semelhantes as do projeto.

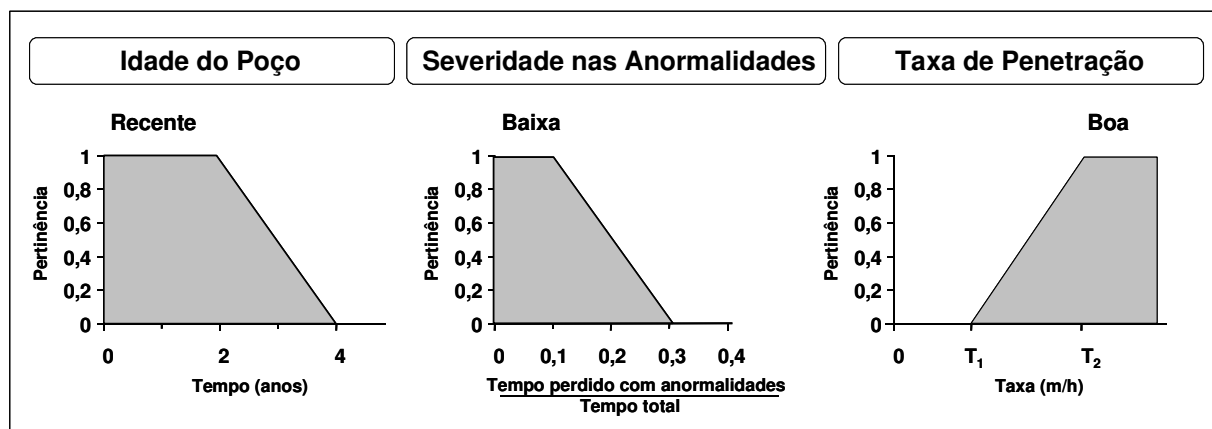


Figura 6.1: Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos de poços recentes, poços com baixa severidade nas anormalidades e poços com boa taxa de penetração.

Após essas definições, e, tendo em vista os parâmetros mencionados, definiu-se a seguinte expressão para computar a relevância de um caso:

$$Relevância = \frac{w_1 \cdot \mu_1(t_1) + w_2 \cdot \mu_2(t_2) + w_3 \cdot \mu_3(t_3) + w_4 \cdot (Similaridade\ Total)}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} \quad (6.1)$$

Onde:

t_1 : idade do poço em anos;

t_2 : fração do tempo perdido com anormalidades pelo tempo total de realização do poço;

t_3 : taxa de penetração em metros por hora;

$\mu_1(t_1)$: função de pertinência para o conjunto nebuloso de poços recentes;

$\mu_2(t_2)$: função de pertinência para o conjunto nebuloso de poços com baixa severidade nas anormalidades;

$\mu_3(t_3)$: função de pertinência para o conjunto nebuloso de poços com boa taxa de penetração;

w_1, w_2, w_3, w_4 : pesos associados aos parâmetros idade do poço, severidade nas anormalidades, taxa de penetração e similaridade total, respectivamente.

6.2 Poços “Frankenstein”

A idéia de poços “Frankenstein” consiste em construir novos poços com fragmentos de poços existentes. Tal abordagem estende o conceito de poços similares. Em outras palavras, pode-se criar uma variabilidade de casos novos a partir das informações dos casos recuperados pelo processo de busca. Na composição de tais casos, seria possível privilegiar as informações que mais se ajustam ao projeto. Logo, estaria-se otimizando a medida de relevância. Essa abordagem provém da hipótese na qual podem existir casos com baixa relevância — principalmente devido a medida de similaridade —, no entanto, com informações aproveitáveis ao projeto. Essas informações estariam em partes do caso relevantes ao projeto — partes “boas” —, mas devido a outras partes menos relevantes — partes “ruins” — o caso como um todo teria uma baixa relevância. Para a composição dos poços “Frankenstein” optou-se pela utilização de um algoritmo genético. Tais algoritmos são ferramentas flexíveis e simples que permitem otimizar um grande

número de variáveis. Na seção seguinte, faremos uma introdução sobre algoritmos genéticos para posteriormente abordarmos a questão dos poços “Frankenstein”.

6.2.1 Fundamentos de Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são métodos de busca de propósito geral inspirados nos mecanismos da evolução natural — principalmente nas teorias evolutivas de Darwin (Darwin, 1859) e no Neodarwinismo. Os primeiros estudos aconteceram nas décadas de 50 e 60 (Fraser, 1957; Holland, 1962), mas somente na década de 70 eles foram introduzidos formalmente por Holland (1975) e, posteriormente, difundidos por um de seus alunos, Goldberg (1989). Tradicionalmente, os algoritmos genéticos têm sido aplicados na busca de soluções em problema de otimização. Por serem inspirados em princípios biológicos, eles empregam uma terminologia derivada da genética e da teoria da evolução natural. No contexto computacional, essa terminologia exprime estruturas bem mais simples que na biologia. Para um melhor entendimento, antes de descrevermos os fundamentos básicos dos algoritmos genéticos, introduziremos os principais termos empregados no contexto computacional:

- *Meio ambiente*: problema a ser resolvido;
- *Indivíduo ou fenótipo*: solução candidata ao problema;
- *População*: conjunto de soluções candidatas;
- *Cromossomo*: estrutura de dados que codifica uma solução candidata, como por exemplo, uma lista ordenada de atributos ou parâmetros;
- *Gene*: atributo ou parâmetro codificado no cromossomo;
- *Alelo*: valores que o gene pode assumir;
- *Genótipo*: coleção de genes usados na representação de uma solução candidata;
- *Geração*: iteração do algoritmo genético;
- *Adaptação*: o quanto uma solução candidata está próxima de uma solução desejável para o problema.

Em linhas gerais, um algoritmo genético mantém uma população de indivíduos, os quais representam possíveis soluções de um dado problema a ser resolvido. Durante a iteração do algoritmo, os indivíduos mais adaptados são selecionados — por meio de um operador de seleção — para constituírem uma população intermediária. Os menos adaptados são descartados; os membros da população intermediária são submetidos a alterações — por meio de operadores genéticos — gerando descendentes para a nova geração. Em seguida, os indivíduos dessa nova geração substituem — operador de substituição — os indivíduos da população inicial. Todo esse processo se repete inúmeras vezes de acordo com algum critério de parada adotado. A cada geração, espera-se obter indivíduos mais adaptados ao meio.

A medida da adaptação de cada indivíduo é fornecida por uma função objetivo a qual deve considerar as características que se deseja maximizar ou minimizar. A população inicial pode ser gerada aleatoriamente, ou através de informações do problema. Entretanto, seja qual for o método de geração dessa população, é importante considerar, como no processo biológico, a diversidade da população. Uma população diversificada implica numa boa amostragem do espaço de busca. Outro aspecto importante salienta que os algoritmos genéticos não garantem encontrar soluções ótimas. Portanto não se pode esperar sua convergência para um ótimo global, sendo assim, é necessário definir um critério de parada. Normalmente, é preestabelecido um número de iterações ou um nível de adaptação. Nas próximas seções, trataremos com mais detalhes alguns aspectos da representação genética e os principais operadores dos algoritmos genéticos clássicos.

6.2.1.1 Representação Genética

Os algoritmos genéticos não operam diretamente com as soluções candidatas, mas com uma representação apropriada dessas soluções — cromossomos. A escolha de uma representação pode não ser uma tarefa simples; ela está intimamente ligada ao problema a ser tratado e não existe uma metodologia pré-estabelecida de como ela deve ser feita. Na maioria das aplicações, em analogia aos cromossomos biológicos, cada solução candidata é representada por uma lista

ordenada de atributos e, de acordo com a representação adotada, cada atributo pode assumir valores binários $\{0,1\}$, inteiros ou ponto flutuante. A representação mais comum é a binária, utilizada no algoritmo genético proposto por Holland (1975).

Para ilustrar uma representação genética, no caso a binária, considere o problema (Goldberg, 1989) de determinar o máximo da função $f(x) = x^2$ no intervalo de números inteiros $[0,31]$. Nesse exemplo, existem 32 indivíduos de modo que 5 bits são suficientes para representar cada um dos indivíduo. A Tabela 6.1 ilustra essa representação.

Tabela 6.1: Exemplo de representação binária.

Indivíduos (Soluções Candidatas)	Representação (Cromossomos)
0	00000
1	00001
2	00010
3	00011
⋮	⋮
31	11111

A representação binária é simples de utilizar, no entanto, em muitos problemas com parâmetros contínuos em que a precisão é importante, essa representação pode ocupar muito espaço na memória. As representações inteira ou ponto flutuante requerem menos espaço na memória, além de estarem mais próxima da realidade do problema.

Atualmente, na literatura especializada há uma discussão das vantagens e desvantagens entre as representações binária, inteira e ponto flutuante quanto ao desempenho dos algoritmos genéticos. Para um aprofundamento no tema, sugerimos Michalewicz (1996).

6.2.1.2 Operador de Seleção

O operador de seleção escolhe os indivíduos para compor a população intermediária. Ele toma como modelo, de uma forma bem mais simples, princípios de seleção natural. Na teoria darwiniana, os indivíduos mais adaptados ao ambiente possuem uma maior probabilidade¹⁵ de sobreviver e de se reproduzirem. De modo análogo, no contexto computacional, associamos a cada indivíduo da população uma probabilidade de sobrevivência proporcional a sua medida de aptidão ao meio — dada pela função objetivo. O operador de seleção considera essa probabilidade para privilegiar os indivíduos mais adaptados.

O operador de seleção pode ser implementado de diversas maneiras. Descreveremos o mais difundido, o método da roleta¹⁶ (Goldberg, 1989), utilizado nos algoritmos genéticos clássicos. Nesse método, cada indivíduo está relacionado com um setor da roleta. A área de cada setor é proporcional ao valor da função objetivo. Dando sequência ao problema exposto na seção anterior — Tabela 6.1 —, considere como exemplo a roleta da Figura 6.2. Tal roleta foi construída para uma população de quatro indivíduos representados pelos cromossomos: 01101, 11000, 01000 e 10011.

¹⁵ Observe que a seleção natural é probabilística, ela não elimina a possibilidade de um indivíduo menos adaptado sobreviver, ou por outro lado, um indivíduo mais adaptado vir a morrer.

¹⁶ Alguns autores preferem utilizar o termo original inglês, *roulette wheel*.

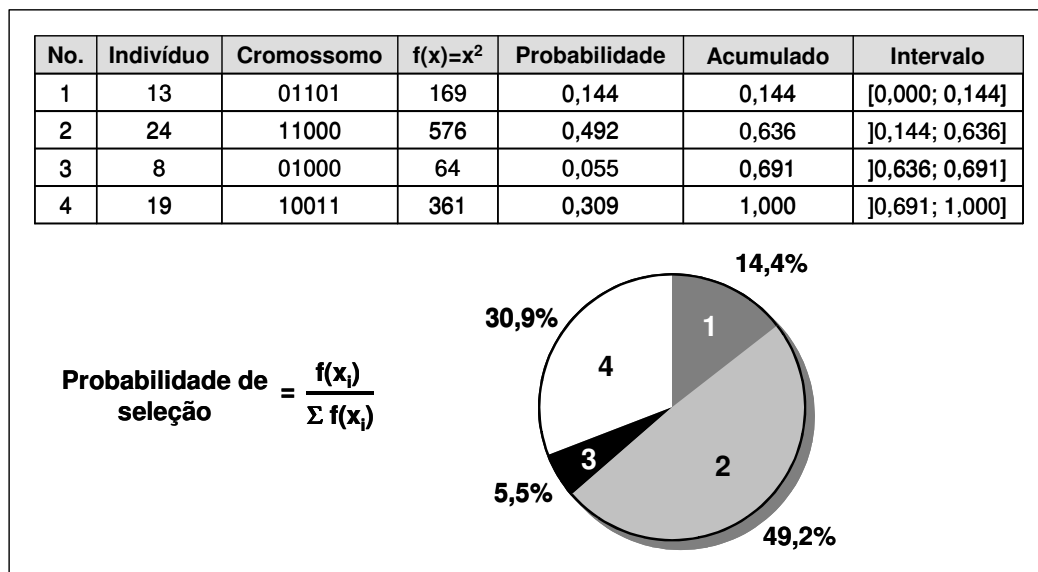


Figura 6.2: Exemplo do método da roleta utilizado pelo operador de seleção (Goldberg, 1989).

Nesse exemplo, para escolher um indivíduo, simula-se o ato de rodar a roleta, gerando um número aleatório no intervalo $[0,1]$. A escolha do indivíduo é feita, verificando em qual intervalo da última coluna tal número pertence. Assim, por exemplo, o número 0,18 seleciona o indivíduo número 2, pois $0,18 \in]0,144; 0,636]$.

6.2.1.3 Operadores Genéticos e Operador de Substituição

Os operadores genéticos são aplicados à população intermediária, para formar uma nova geração de indivíduos. Eles são os principais mecanismos para explorar o espaço de busca. Os operadores mais comuns são o *crossover* e a mutação.

O operador de *crossover* se espelha no processo biológico de reprodução sexuada. De uma forma geral, ele realiza a troca de características entre indivíduos para gerar novos indivíduos.

Normalmente, eles são aplicados de acordo com uma probabilidade¹⁷ (≈ 1) — taxa de *crossover*. Há vários tipos de operadores de *crossover*, sendo o mais comum o operador de um ponto. Nesse operador, determina-se aleatoriamente uma posição de corte nos cromossomos de um par de indivíduos. Dois novos indivíduos — indivíduos filhos — são formados pela troca dos dois segmentos de seus pais. Esse processo está ilustrado na Figura 6.3(a).

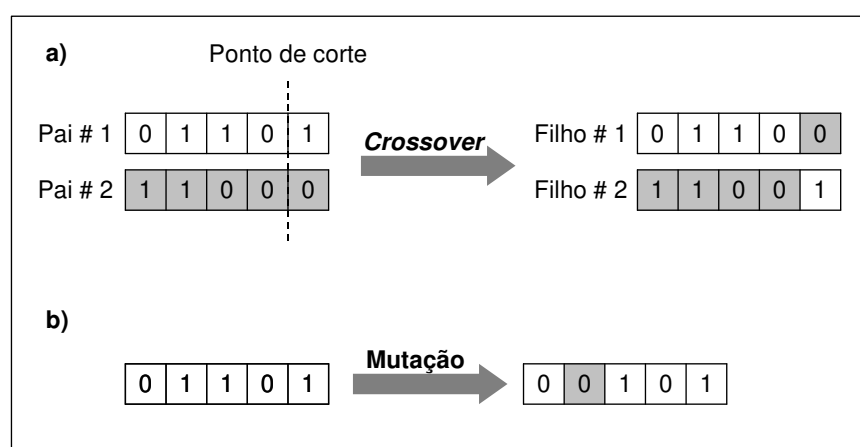


Figura 6.3: Exemplo de operadores genéticos aplicados em cromossomos com representação binária (Goldberg, 1989): (a) *crossover* de um ponto e (b) mutação.

O operador de mutação provoca uma mudança aleatória de baixa probabilidade¹⁸ ($\ll 1$) — taxa de mutação —, de um ou mais genes de um cromossomo. No algoritmo genético clássico, com representação binária, quando o gene selecionado possui o valor 1 ele o troca pelo 0, e vice-versa. Esse processo está ilustrado na Figura 6.3(b).

Observe que o operador de *crossover* equivale a uma busca local, pois ele atua dentro de uma região do espaço determinada pelo tamanho da população e sua diversidade. Diferentemente, o

¹⁷ Esta probabilidade deve ser alta, pois a criação de novos indivíduos por *crossover* permite ao algoritmo explorar regiões promissoras do espaço de busca.

¹⁸ Se a taxa de mutação for alta, teremos um grande número de alterações, tornando o algoritmo um método de busca aleatória.

operador de mutação permite explorar outras regiões à medida em que vai introduzindo novas características nos indivíduos.

Com a criação de novos indivíduos, um outro operador — operador de substituição — determinará quais dos indivíduos da antiga população devem ser substituídos. Esse operador pode atuar de várias maneiras; uma delas é fazer uma substituição completa, isto é, uma nova geração substitui completamente a geração de pais. Assim, um indivíduo irá se reproduzir somente com indivíduos da mesma geração. Outra maneira é substituir os antigos indivíduos à medida em que os novos vão sendo criados¹⁹. Esse último descreve melhor a natureza, pois é comum indivíduos, principalmente os mamíferos, conviverem com seus descendentes.

6.2.2 Algoritmo Genético Aplicados a Poços

De acordo com a discussão do início do capítulo — seção 6.2 — estamos interessados numa abordagem a qual permita otimizar a relevância dos casos recuperados pelo processo de busca. Para tal, foi adotada uma abordagem evolutiva, mais especificamente, um algoritmo genético. Este algoritmo está ilustrado no diagrama da Figura 6.4. É um algoritmo genético simples descrito em Goldberg (1989) com poucas modificações. Ele possui três operadores básicos: seleção, *crossover* e substituição. Nesta abordagem, não foi prevista um operador de mutação, deixou-se para estudos subseqüentes o como atuaria tal operador.

¹⁹ Este tipo de substituição é conhecido como *steady-state*.

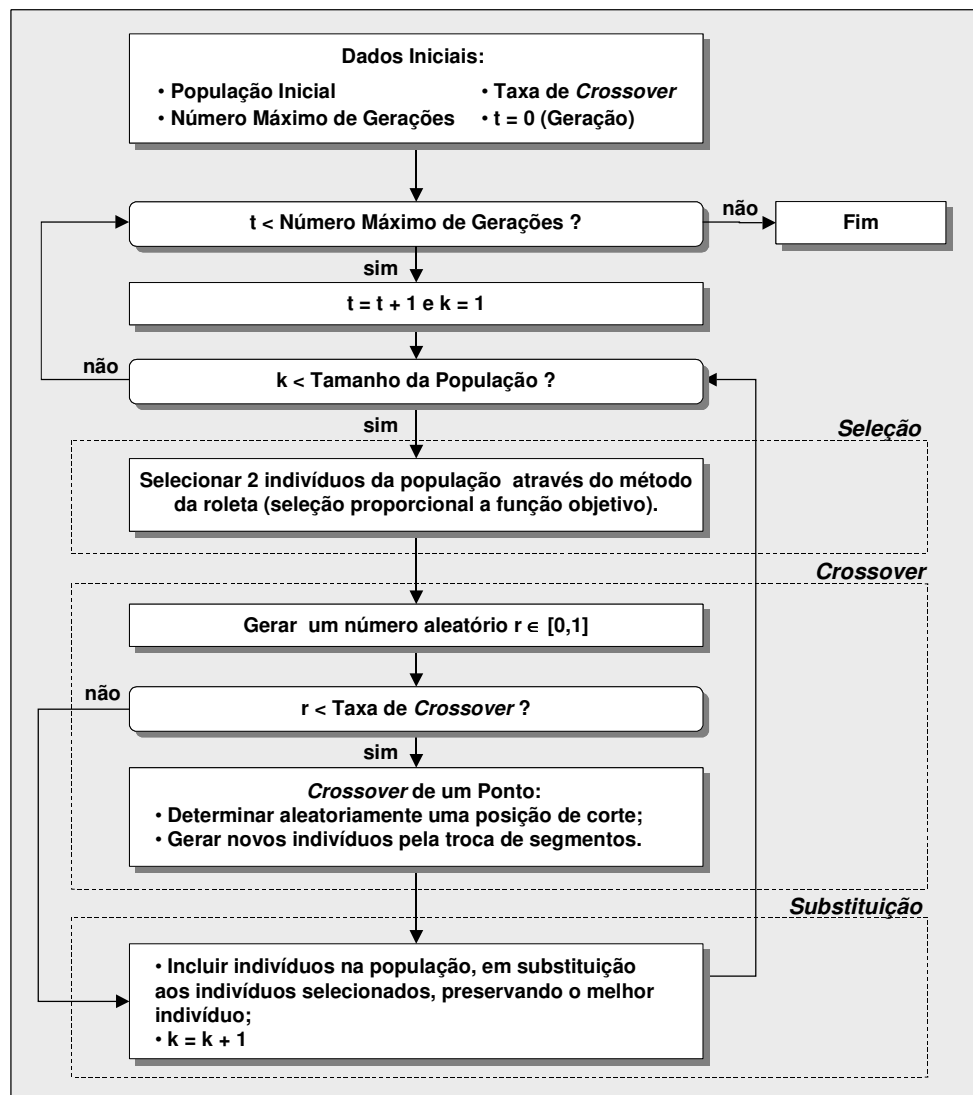


Figura 6.4: Diagrama do algoritmo genético empregado.

A população inicial, como mencionado, são os casos recuperados no processo de busca. O número desses casos pode ser controlado, ajustando-se a similaridade mínima requerida ao projeto. Para a representação genética, sugerimos que cada poço da população inicial seja dividido em intervalos operacionais os quais foram chamados de trechos-poço²⁰. Desta forma, um

²⁰ Tal divisão do poço em trechos-poço é uma estratégia adotada por especialistas da engenharia de poços, a qual permite isolar e analisar intervalos importantes do poço para o dimensionamento do projeto.

projeto com um trecho a ser perfurado, semelhante a um ou mais trechos-poço de um determinado caso, pode herdar as informações de como perfurar tal trecho. Relacionaremos cada trecho-poço a um gene e, conseqüentemente, cada poço estará relacionado a um cromossomo. Cada gene contém 3 informações: nome do caso, topo do trecho e a base do trecho — em termos de profundidade vertical. Evidentemente, o comprimento do cromossomo irá depender do número de trechos-poço no qual o poço foi dividido. A Figura 6.5 ilustra essa representação genética.

Gene 1			Gene 2			...	Gene n		
Caso A	Topo 1	Base 1	Caso A	Topo 2	Base 2		Caso A	Topo n	Base n

Figura 6.5: Representação genética de um poço *A* dividido em *n* trechos-poço.

É desejável que a divisão dos poços em trechos-poço seja realizada pelo projetista, pois assim, ele pode selecionar intervalos os quais julgue importante para o projeto. Esta divisão também é passível de realização pelo WellCase, no entanto, os critérios para sua realização provavelmente serão diferentes daqueles que o projetista possivelmente empregará em sua análise. Desta forma, caso a divisão se dê pelo WellCase, adota-se 4 parâmetros:

- Tipo de formação;
- Fase da perfuração;
- Tipo de broca;
- Tipo de fluido de perfuração.

Os trechos-poço serão aqueles intervalos nos quais tais parâmetros são mantidos. Ou seja, em um mesmo trecho-poço encontra-se uma única formação, uma única fase, um único tipo de broca e por fim um único tipo de fluido de perfuração. Esta estratégia provém da hipótese na qual tais parâmetros — quanto mantidos constantes para um determinado intervalo — estariam adequados, ou pelo menos compatíveis, com as propriedades físicas do corpo de rocha contido naquele intervalo. A medida que a perfuração prossegue, tais propriedades físicas podem alterar-se de

forma a exigir um ajuste nos parâmetros mencionados. Isto estaria caracterizando um novo trecho-poço.

Para o operador de seleção, adotou-se o método da roleta com algumas modificações. A escolha do primeiro indivíduo do par é realizada com a roleta na sua forma tradicional; entretanto, na escolha do segundo, reconstrói-se a roleta sem o primeiro indivíduo selecionado para o par. Essa estratégia evita que o operador de *crossover* atue com indivíduos duplicados os quais podem levar a uma perda de diversidade da população. A estratégia é mais sensível com populações pequenas, tornando-a vantajosa para a nossa finalidade, pois acredita-se que o número de casos, os quais irão compor a população, não será grande.

Em relação ao operador genético de *crossover*, foi empregado o operador de um ponto também com algumas alterações. Esse operador é aplicado a um par de indivíduos conforme a seguir:

- escolhe-se aleatoriamente um indivíduo do par;
- escolhe-se aleatoriamente uma posição de corte na representação genética de tal indivíduo;
- a posição de corte do outro indivíduo do par será no gene que possuir a profundidade vertical — topo do trecho poço — mais próxima da posição escolhida para o primeiro indivíduo;
- em seguida, os segmentos de cromossomos criados a partir das posições de corte são trocados.

A Figura 6.6 ilustra este processo com um exemplo numérico.

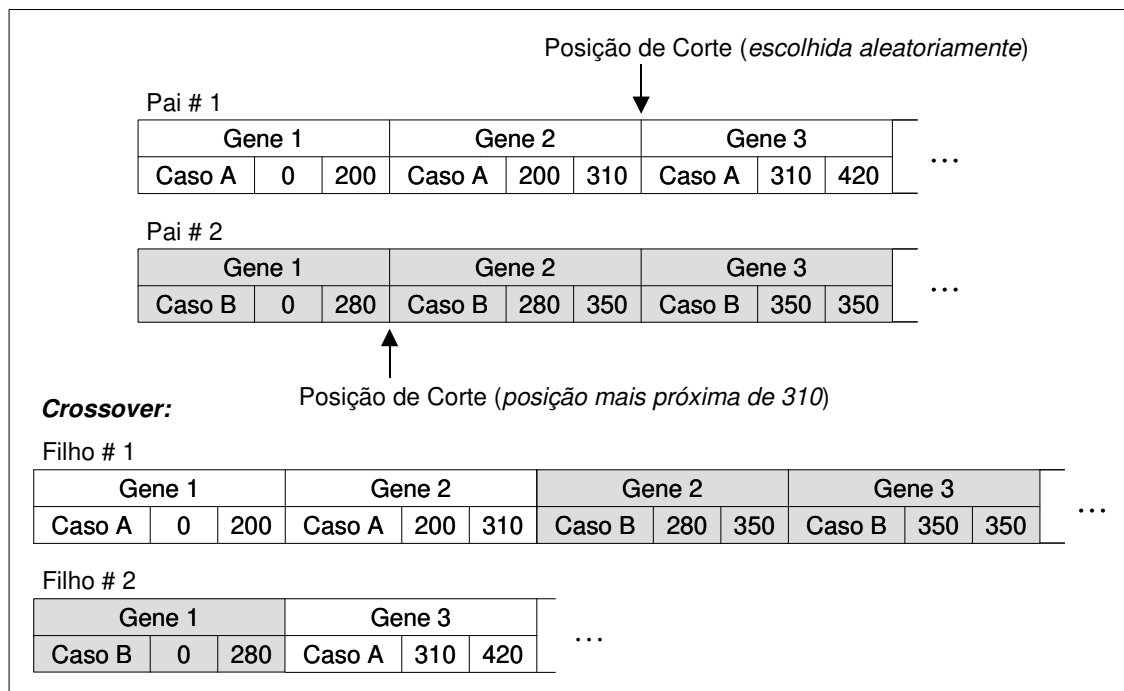


Figura 6.6: Exemplo numérico do operador de *crossover* utilizado.

Para a medida de adaptação de cada indivíduo, esta será a relevância que tal indivíduo possui com o projeto. No entanto, como os novos indivíduos herdam informações de outros indivíduos, é necessário definir os valores os quais serão empregados na Equação 6.1:

- *Idade do indivíduo*: média das idades dos trechos-poço os quais formaram o indivíduo;
- *Severidade nas anormalidades*: fração da soma dos tempos perdidos com anormalidades pela soma dos tempos totais dos trechos-poço os quais formaram o indivíduo;
- *Taxa de penetração*: fração da soma dos comprimentos pela soma dos tempos totais dos trechos-poço os quais formaram o indivíduo.

Para o caso particular da similaridade total, esta é composta por nove similaridades específicas as quais foram definidas no **Capítulo 5**. No cálculo dessas similaridades específicas são necessários dados de lâmina d'água, ângulo médio de desvio, profundidade vertical, afastamento, distância,

formações, topos das formações, espessura das formações e azimuth — veja Figura 5.3. Para a definição desses valores adotaram-se as seguintes estratégias:

- *Lâmina d'água*: média dos valores de lâminas d'água dos indivíduos os quais formaram o novo indivíduo;
- *Ângulo médio de desvio*: média dos ângulos médio de desvio dos trechos-poço os quais formaram o novo indivíduo. Tal média é calculada com valores os quais estão acima de um valor mínimo pré-definido;
- *Profundidade vertical*: profundidade da base do último trecho-poço do indivíduo — veja Figura 6.7;
- *Afastamento*: distância horizontal entre a linha vertical que passa pelo topo do primeiro trecho-poço e a base do último trecho-poço do indivíduo — veja Figura 6.7;
- *Distância*: média das distâncias dos indivíduos os quais formaram o novo indivíduo;
- *Formação*: formações dos trechos-poço os quais formaram o novo indivíduo;
- *Topo das formações*: topos das formações dos trechos-poço os quais formaram o novo indivíduo;
- *Espessura das formações*: espessuras das formações dos trechos-poço os quais formaram o novo indivíduo;
- *Azimuth*: ângulo entre a direção norte e a direção definida pelo topo do primeiro trecho-poço com a base do último trecho-poço — veja Figura 6.7.

No caso de poços direcionais, é desejável penalizar aqueles indivíduos que apresentam mudanças muito bruscas em suas trajetórias. Essa penalização é aplicada sobre o valor da relevância do indivíduo:

$$\text{Adaptação} = \text{Relevância} - \text{Penalização} \quad (6.2)$$

Um bom parâmetro para ser utilizado no cálculo da penalização é o ângulo de *dog-leg*²¹. A idéia é penalizar os indivíduos que possuem ângulos de *dog-leg* acima ou igual a um valor máximo. Tais ângulos seriam calculados entre dois trechos-poço subsequentes. Assim, definiu-se a seguinte expressão:

$$Penalização = Relevância \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i}{180N} \quad \text{para } \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N \geq \beta_{\max} \quad (6.3)$$

O número β_i é o ângulo de *dog-leg* calculado entre dois trechos-poço subsequentes e $\beta_{\max}$ é o ângulo máximo de *dog-leg* admitido. O ângulo de *dog-leg* é dado por:

$$\beta_i = \arccos[\cos(\theta_{i+1} - \theta_i) - \sin \theta_i \cdot \sin \theta_{i+1} \cdot (1 - \cos(\phi_{i+1} - \phi_i))] \quad (6.4)$$

Onde:

θ_i : ângulo médio de desvio do trecho-poço i ;

ϕ_i : azimuth do trecho-poço i .

Para facilitar a compreensão, na Figura 6.7 estão ilustradas as projeções vertical e horizontal de um típico poço “Frankenstein”. Nesta figura, podem ser visualizadas as projeções dos ângulos de *dog-leg*, assim como, alguns dos parâmetros mencionados anteriormente — profundidade vertical, afastamento e azimuth.

²¹ Na linguagem de petróleo, *dog-leg* é uma mudança brusca na trajetória do poço. Assim, pode-se definir o ângulo de *dog-leg* como o ângulo formado por dois vetores tangentes à trajetória do poço tomados em pontos distintos. Note que tal ângulo inclui tanto mudanças de ângulo médio de desvio como azimuth.

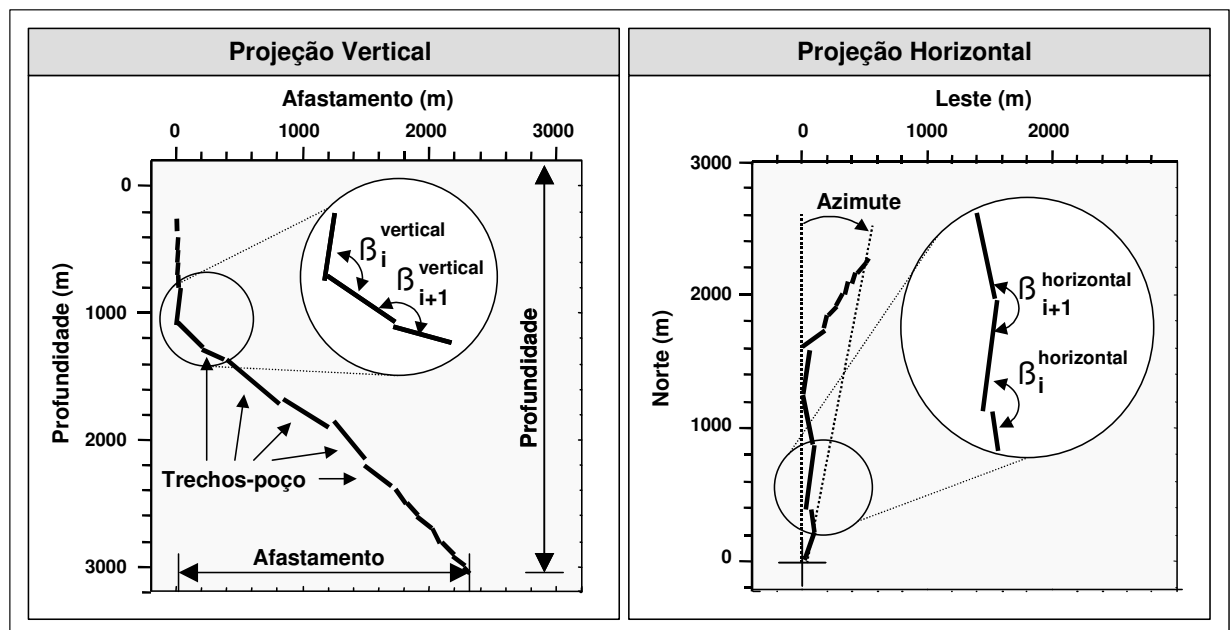


Figura 6.7: Projeções vertical e horizontal de um poço “Frankenstein”.

Durante a execução do algoritmo genético, os novos indivíduos são incluídos na população — à medida em que vão sendo criados — substituindo aqueles selecionados para os operadores genéticos. Entretanto, neste processo, o melhor indivíduo de uma geração pode ser perdido. Para evitar que isso ocorra, optou-se por realizar a substituição sempre preservando o melhor indivíduo²². Para o critério de parada do algoritmo, pode-se preestabelecer um número de iterações. Outra possibilidade é continuar as iterações enquanto melhoras significativas possam ser avaliadas ou, ainda, até que o algoritmo venha a convergir²³.

²² Este tipo de estratégia é denominada de elitismo.

²³ A convergência neste caso é a perda de diversidade da população com a produção de indivíduos similares ou idênticos.

6.3 Dimensionamento do Projeto

O dimensionamento do projeto de um poço é última etapa do processo de adaptação — e certamente a mais trabalhosa. Propõem-se que tal dimensionamento seja realizado com base nos dados e informações consolidadas e contidas nos poços provenientes do algoritmo genético — poços “Frankenstein”. Esses poços foram construídos a partir de fragmentos — trechos-poço — dos poços recuperados pelo processo de busca, sendo que tais fragmentos foram aqueles que mais se adequaram aos objetivos do projeto. Assim, em um único poço “Frankenstein” existem informações de diversos poços, onde pode-se encontrar detalhes da perfuração, cimentação, revestimentos, fluidos, anormalidades, restrições de várias naturezas entre outros. Além dessas informações, o dimensionamento deve ser apoiado por modelos matemáticos e algoritmos computacionais. Na prática, normalmente o dimensionamento do projeto de um poço — como mencionado no **Capítulo 2** — é realizado por equipes responsáveis por áreas específicas do projeto. Essas equipes, muitas vezes possuem metodologias próprias e adotam os mais diversos aplicativos e simuladores operacionais²⁴ disponíveis na empresa em que atuam. Entretanto, a eficiência dessas técnicas dependem de parâmetros e condições iniciais para calibração. Essas informações são obtidas com a experiência do usuário ou através de dados de históricos de poços anteriores. Em vista disso, neste trabalho não se tem a pretensão de automatizar o dimensionamento do projeto — mesmo porque, no processo de adaptação dos poços, o ser humano possui um desempenho superior a qualquer processo automatizado. O que se propõe é a integração do WellCase com os *softwares* normalmente utilizados. Desta forma, tem-se um ambiente computacional onde estão disponibilizados dados e informações consolidadas de projetos anteriores, assim como simuladores e aplicativos. Também podem e devem ser acoplados, em tal ambiente, sistemas inteligentes os quais auxiliariam os engenheiros de

²⁴ Esses aplicativos e simuladores operacionais são técnicas bastante difundidas e documentadas, por essa razão elas não serão abordadas neste trabalho. Além das técnicas encontradas comercialmente, pode-se adicionar os algoritmos desenvolvidos pelos próprios técnicos e engenheiros como resultado de suas experiências na engenharia de poços.

perfuração na análise das informações contidas nos poços “Frankenstein”. Esses sistemas proporcionariam aos especialistas de cada área maiores facilidades para a otimização do projeto, por meio de diagnósticos, sugestões de procedimentos ou outras informações importantes.

Como exemplo de sistemas que podem ser integrados ao WellCase, tem-se em Mendes^(b) *et al.* (2001) e Fear *et al.* (1994) a descrição de sistemas inteligentes, construídos com a finalidade de auxiliar na análise de brocas de perfuração. Agora, na linha de metodologia matemática, pode-se mencionar os trabalhos de Roque (1992) e Mendes^(c) *et al.* (2001). O primeiro apresenta um método para o dimensionamento de colunas de revestimentos; o segundo propõe uma abordagem com números nebulosos e tolerância de *kick*, para o posicionamento das sapatas das colunas de revestimentos.

Capítulo 7

Armazenamento e Esquecimento

A essência do raciocínio baseado em casos é a utilização do aprendizado. Tal aprendizado restringe, em princípio, ao armazenamento de novos casos. Por sua vez, para armazenar um novo caso é necessário avaliar seu desempenho. Neste capítulo, sugerimos a utilização de curvas de aprendizado como ferramenta auxiliar nesse processo de avaliação. Ao final do capítulo, abordaremos a questão do crescimento do número de casos na base de casos e como o processo de esquecimento faz a manutenção deste casos.

7.1 Fundamentos de Curvas de Aprendizado

Normalmente, o desempenho de um indivíduo ou uma organização envolvida em algum processo repetitivo aperfeiçoa-se com o tempo. As primeiras investigações sobre aprendizado revelam o que já se sabia na prática, ou seja, o tempo necessário para a realização de uma tarefa diminui com o aumento da experiência adquirida com tal tarefa, (Thorndike, 1898; Thurstone, 1919; Graham & Gagne, 1940). O primeiro esforço para desenvolver relações entre aprendizado e variáveis quantitativas foi realizado por Wright (1936), resultando na teoria da curva de aprendizado. Segundo Brett & Millheim (1986), essa teoria foi mais tarde expandida por Asher (1956) com aplicações na fabricação de aviões durante a Segunda Guerra Mundial. Atualmente,

tal teoria tem sido aplicada em setores extremamente diversos da indústria. Talvez essa riqueza de aplicações seja reflexo da capacidade da teoria em descrever não somente o aumento da habilidade de um único indivíduo, mas o comportamento coletivo de várias pessoas com o objetivo de executar uma mesma tarefa — da melhor maneira — progressivamente.

De um modo geral, a curva de aprendizado proposta inicialmente por Wright (1936) — Equação 7.1 — descreve, em relação ao tempo, a execução de uma tarefa ou processo repetitivo. Nela, observamos — Figura 7.1 — que, no início, o tempo de execução é elevado, pois, nesta etapa, ocorre um processo de familiarização sujeito ainda a vários erros de execução. Posteriormente, a execução começa a se aperfeiçoar com a diminuição dos erros e uma gradativa otimização, levando conseqüentemente a tempos menores de execução. Numa última etapa, ocorre um nivelamento da curva, indicando uma maior maturidade com o conhecimento adquirido:

$$T_n = T_1 n^{-\alpha} \quad (7.1)$$

Onde:

T_1 : tempo para produzir a primeira unidade, ou realizar uma tarefa pela primeira vez;

T_n : tempo para produzir a n-ésima unidade, ou realizar uma tarefa pela n-ésima vez;

n : contagem da unidade ou tarefa;

α : coeficiente de aprendizado.

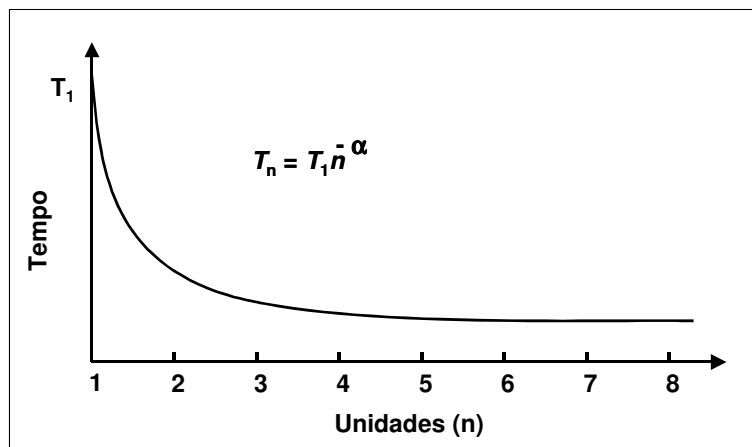


Figura 7.1: Curva de aprendizado proposta por Wright (1936).

Em uma empresa, a curva de aprendizado é um modelo que agrega o aprendizado de todas as fontes da organização. Dentre os fatores que mais contribuem para tal aprendizado estão: as novas tecnologias, o uso de ferramentas e máquinas mais eficientes, familiarização com a tarefa e o ambiente no qual ela é realizada e, por fim, o gerenciamento eficiente das atividades. Todos esses fatores, assim como o aprendizado, implicam em um melhor desempenho e, portanto, custos menores ao produto final.

7.2 Curvas de Aprendizagem na Avaliação de Poços

Na perfuração de poços de petróleo, o primeiro poço em um novo campo ou área, normalmente toma mais tempo — conseqüentemente custos maiores. Uma progressiva redução no tempo de perfuração é obtida com poços subsequentes até um momento que não haja mais aperfeiçoamentos a fazer em termos de segurança e custos. Brett & Millheim (1986) observaram que a teoria da curva de aprendizado poderia ser aplicada a tais situações. Desta maneira, poderia-se avaliar o desempenho da perfuração de um conjunto de poços em uma determinada área. Assim, com um estudo envolvendo mais de 2000 poços perfurados em diferentes regiões geográficas — *onshore* e *offshore* — eles propuseram uma expressão específica para aplicações

na perfuração de poços de petróleo — Equação 7.2. A Figura 7.2 ilustra tal expressão, evidenciando o comportamento típico, quando se inicia a perfuração em uma nova área.

$$t = C_1 e^{(1-n)C_2} + C_3 \quad (7.2)$$

Onde:

t : tempo para perfurar o n -ésimo poço;

n : contagem do poço dentro de uma série de poços similares;

C_1 : diferença de tempo entre o primeiro e o último poço da uma série;

C_2 : taxa de aprendizado;

C_3 : tempo mínimo de perfuração de uma área.

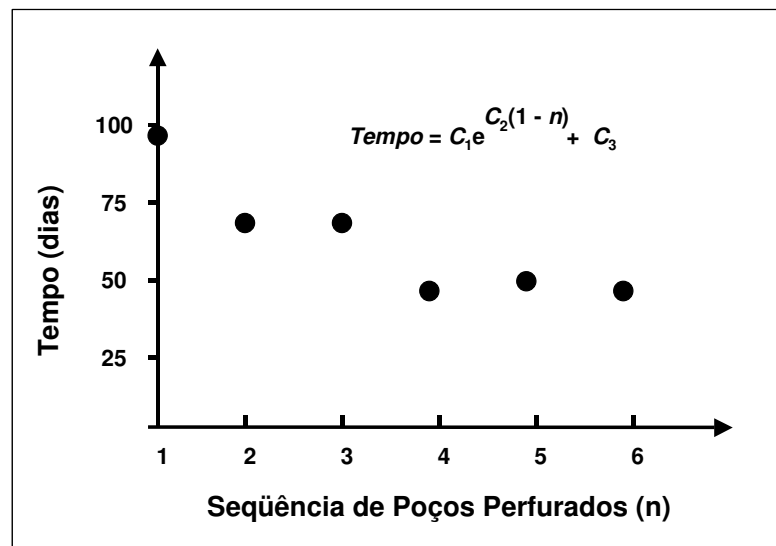


Figura 7.2: Curva de aprendizado proposta por Brett & Millheim (1986).

Na expressão proposta por Brett & Millheim, o valor de C_1 representa o tempo adicional para perfurar o primeiro poço numa nova área em relação ao último perfurado. Esse valor implica na habilidade da companhia em estar preparada para as dificuldades que porventura possam ocorrer

em tal área — dentre estas podemos citar as anormalidades e a disponibilidade tecnológica. O valor de C_2 representa a velocidade e a eficiência na qual a organização consegue adaptar-se ao novo ambiente de perfuração, em outras palavras, a habilidade em adquirir experiência com poços anteriores e aplicá-la nos próximos. Por fim, o valor de C_3 representa a capacidade de manter um certo nível de desempenho ou, algumas vezes, melhorá-lo. Esse nível deve aproximar-se da média ideal da área onde se está perfurando.

Pode-se perguntar por que não utilizar o custo total do poço ao invés do tempo de perfuração. Brett & Millheim justificam que a curva de aprendizado pode fornecer um resultado aparente com a utilização do custo do poço. Tal custo pode introduzir um “ruído” que estaria associado, por exemplo, à variação de preços de materiais, aluguel de sonda, etc. Ao contrário do custo, o tempo de perfuração é uma variável mais apropriada, estando intimamente relacionada com o desempenho da perfuração.

No contexto deste trabalho, em específico no processo de armazenamento de casos, a curva de aprendizado pode auxiliar na avaliação de um novo poço. Para tal, primeiramente deve-se selecionar um conjunto de poços similares ao poço candidato ao armazenamento e organizá-los na seqüência a qual foram perfurados. Essa tarefa é essencial, mas não é simples — principalmente se estivermos trabalhando com um conjunto grande de poços. Neste aspecto, o processo de busca é uma ferramenta poderosa e indispensável. Posteriormente, com um conjunto de poços adequados e agrupados apropriadamente, é possível construir o gráfico da curva de aprendizado. Essa curva fornece uma ampla visão da situação do poço candidato ao armazenamento e da evolução dos poços similares selecionados. A curva também pode ser desmembrada em várias subatividades, como por exemplo: perfuração, cimentação, manobra, problemas, etc. Assim é possível avaliar cada atividade separadamente e identificar em qual delas se encontra um eventual problema. A Figura 7.3 é um exemplo de como a curva de aprendizado pode ser desmembrada.

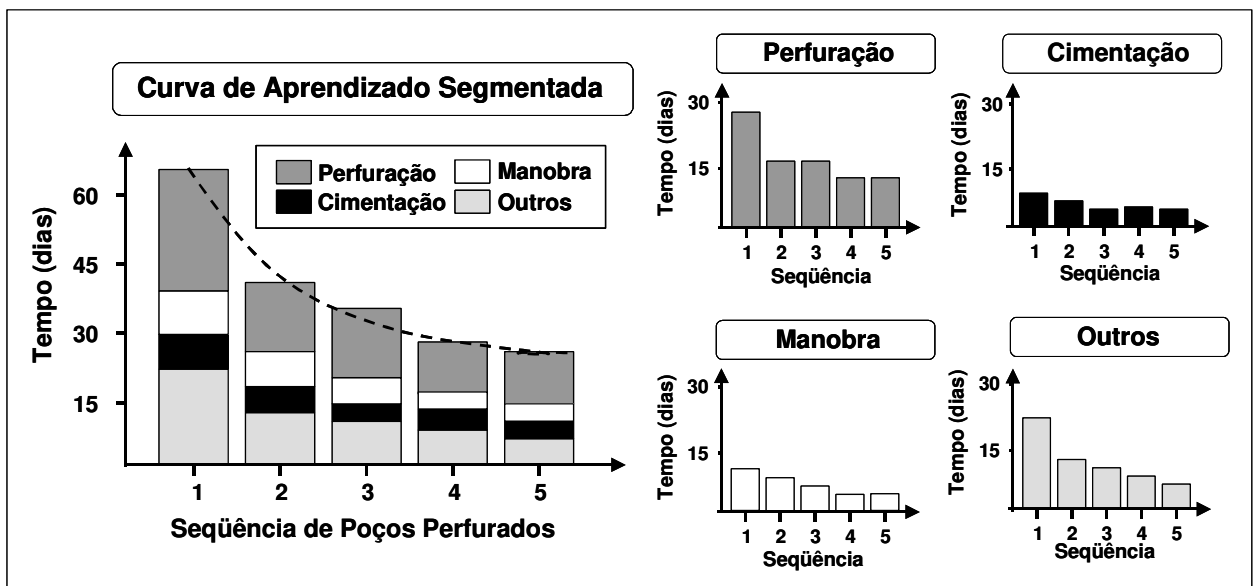


Figura 7.3: Exemplo de uma curva de aprendizado típica segmentada em atividades.

Nesse exemplo, comparando os 5 poços, notamos a presença do aprendizado em todas as atividades, a saber, perfuração, manobra, cimentação e outros. Agora, considerando o poço de número 5 como um candidato ao armazenamento, verificamos que ele obteve um desempenho condizente com os seus similares. Entretanto, tal poço não trouxe uma melhora significativa em relação ao poço anterior na seqüência — o poço de número 4. Por isso, talvez, não haja necessidade de armazená-lo. Por outro lado, se uma das atividades apresentasse algum problema, isso seria notado na curva de aprendizado. Logo, a metodologia permite identificar qual ou quais atividades são problemáticas. A partir de tal identificação, o usuário pode focar sua análise na determinação da causa do problema²⁵.

Em suma, a curva de aprendizado sintetiza uma grande quantidade de dados, fornecendo uma investigação macroscópica. Essa investigação auxilia a identificar pontos passíveis de falhas no projeto. Uma vez identificados tais pontos, uma análise mais aprofundada é possível por meio de

²⁵ Essa análise é mais detalhada e o usuário pode ser auxiliado, quando possível, por sistemas inteligentes dotados com conhecimento especialista apropriado.

outros processos de investigação — apropriados a cada problema específico. Existe um grande número de problemas para os quais se pode buscar o auxílio de sistemas inteligentes. Na existência de sistemas inteligentes prontos, a intenção é acoplá-los ao WellCase.

7.3 Esquecimento

De acordo com o problema levantado por Freitas (1996), o número de casos na base de casos pode crescer excessivamente e dificultar a identificação dos casos relevantes a um dado projeto. Cada novo caso incorporado acarretaria, ao processo de busca, um esforço computacional adicional. Para este problema é proposto remover alguns casos da base de casos através do seguinte critério:

- Criar uma hierarquia com os casos que possuem um baixo índice de reaproveitamento e remover casos respeitando tal hierarquia.

Toda vez que um determinado caso serve de base para a elaboração do projeto de um novo poço, deve-se registrar esta informação, indicando inclusive para qual projeto o caso foi utilizado²⁶. Com esta informação disponível, pode-se definir uma hierarquia com os casos os quais possuem um baixo índice de reaproveitamento. Assim, o processo de esquecimento pode percorrer a base de casos e remover casos de acordo com tal hierarquia.

²⁶ Tal informação também é valiosa na análise de problemas que porventura um novo poço venha a apresentar. Ou seja, pode-se estudar o caso — ou casos — que foi correlação para um novo poço problemático, na intenção de identificar possíveis pontos de falha no projeto de tal poço.

Capítulo 8

Testes

Até o momento, procurou-se formalizar e definir uma arquitetura baseada em casos para projetos de poços de petróleo. Esperamos que os capítulos anteriores tenham coberto grande parte dos aspectos pertinentes à modelagem dos processos envolvidos em tal arquitetura. Agora, neste capítulo, tem-se como objetivo principal averiguar a validade desses processos. Para este propósito, foi implementado um sistema protótipo com o qual foram realizados testes de forma a explorar as principais características desses processos. Antes de abordarmos os resultados obtidos, apresentaremos os poços utilizados nos testes.

8.1 Poços Utilizados nos Testes

Para os testes foram utilizados sete poços submarinos em lâmina d'água rasa perfurados a partir de uma unidade de perfuração marítima conforme ilustrado na Figura 8.1(a). Na Figura 8.1(b), tem-se uma vista horizontal de tais poços. Excetuando o poço MA1 — Figura 8.2 —, estes são poços direcionais de alto risco — devido ao seu elevado ângulo médio de desvio e afastamento. São poços de completação seca onde a zona produtora está aproximadamente a 3000 metros de profundidade. Todos foram perfurados dentro do intervalo de 1 ano. As Figuras 8.2 a 8.8 trazem detalhes de tais poços quanto à trajetória, revestimentos e geologia.

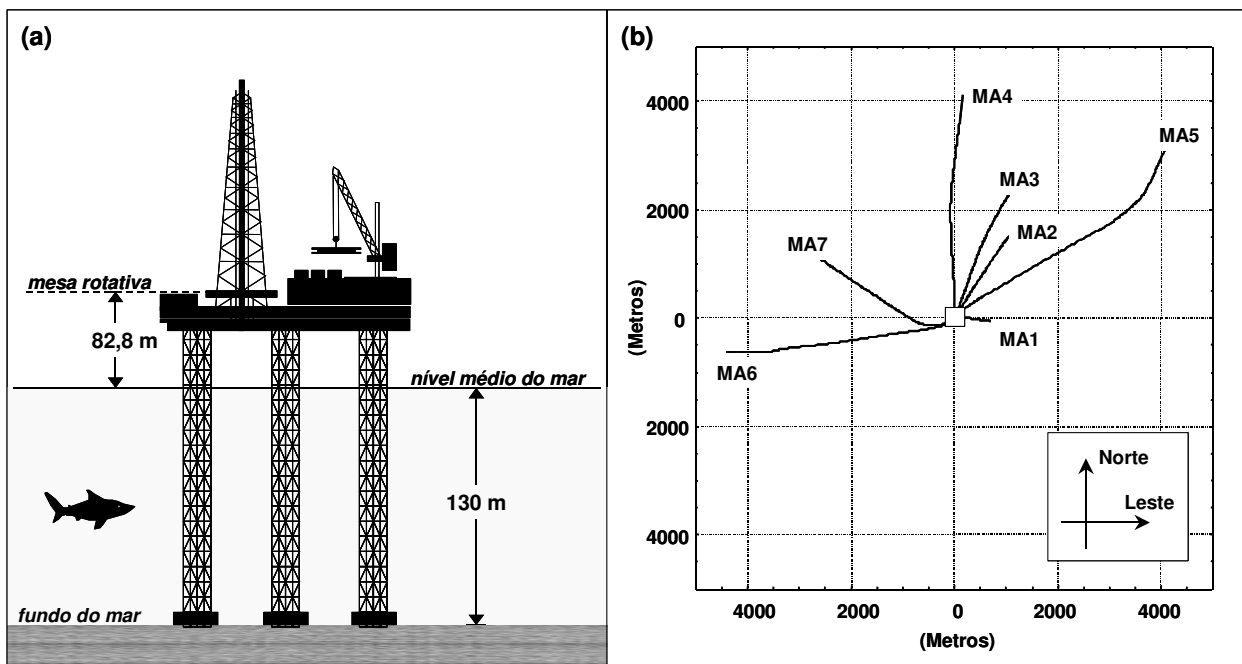


Figura 8.1: (a) Esquema da plataforma com os níveis de referência; (b) Vista horizontal dos poços.

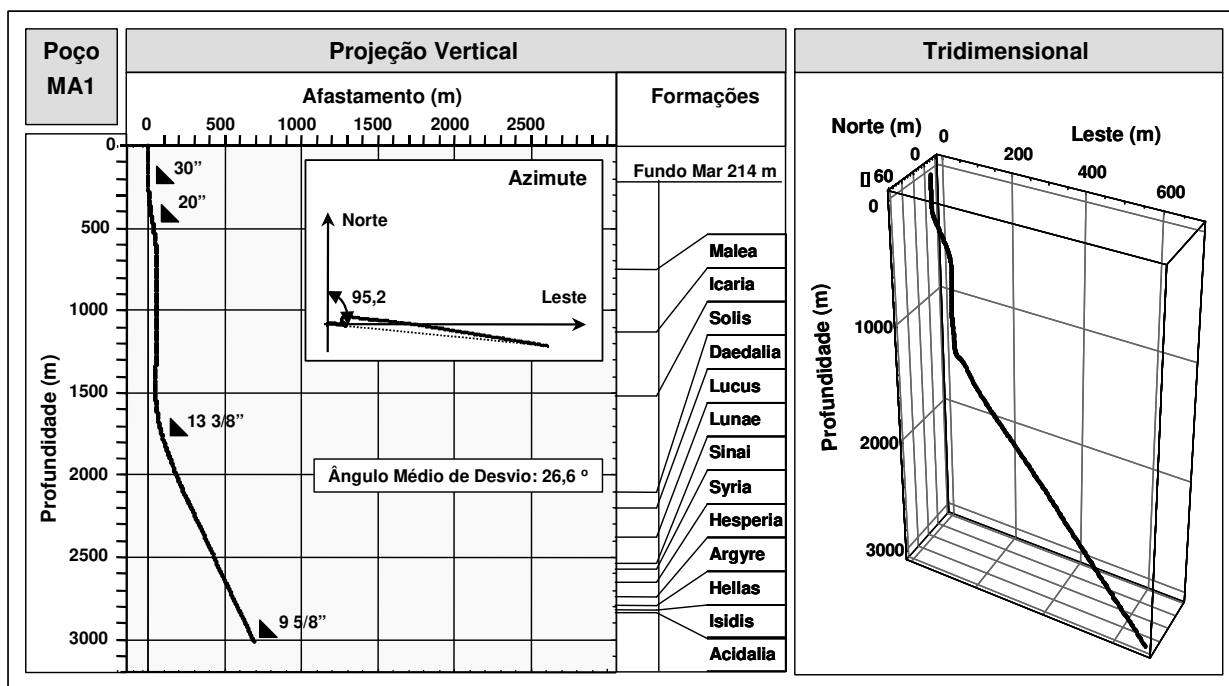


Figura 8.2: Esquema do poço MA1.

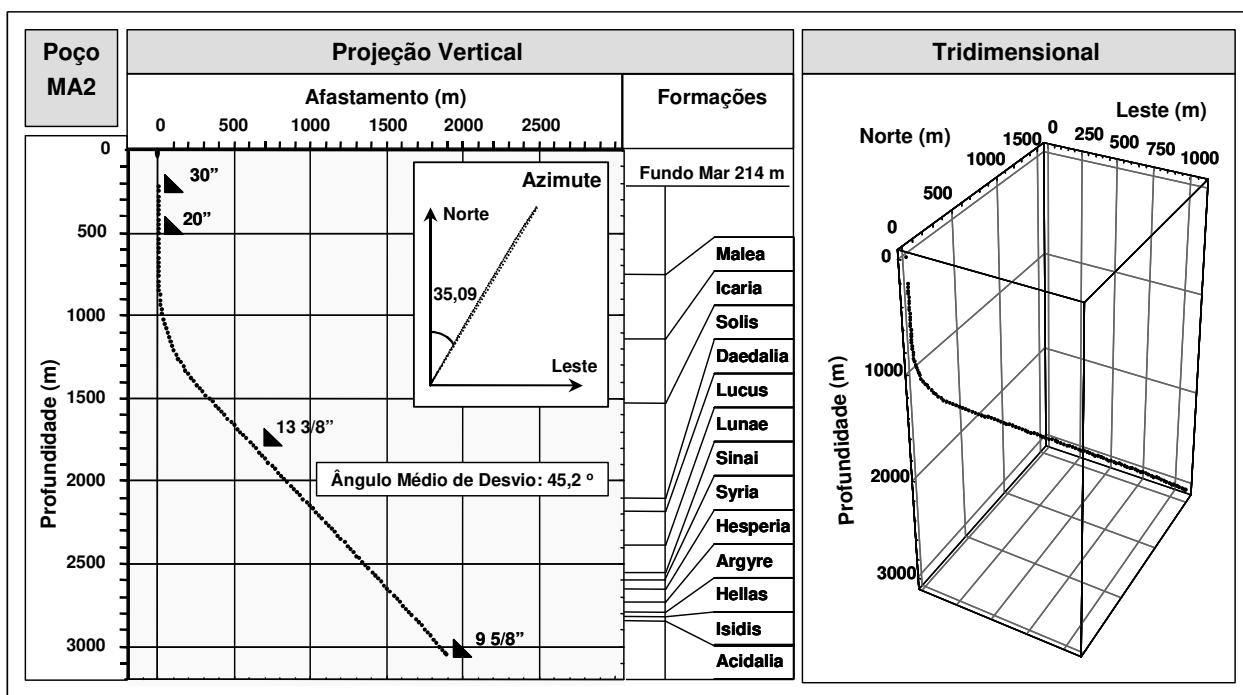


Figura 8.3: Esquema do poço MA2.

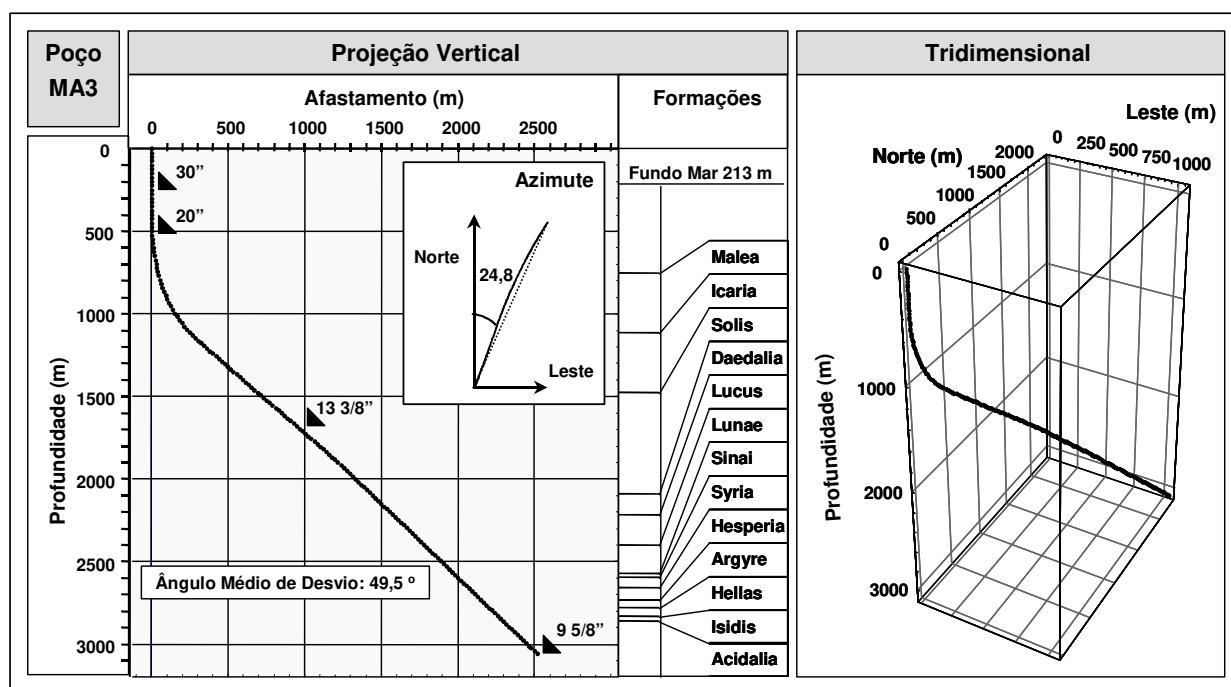


Figura 8.4: Esquema do poço MA3.

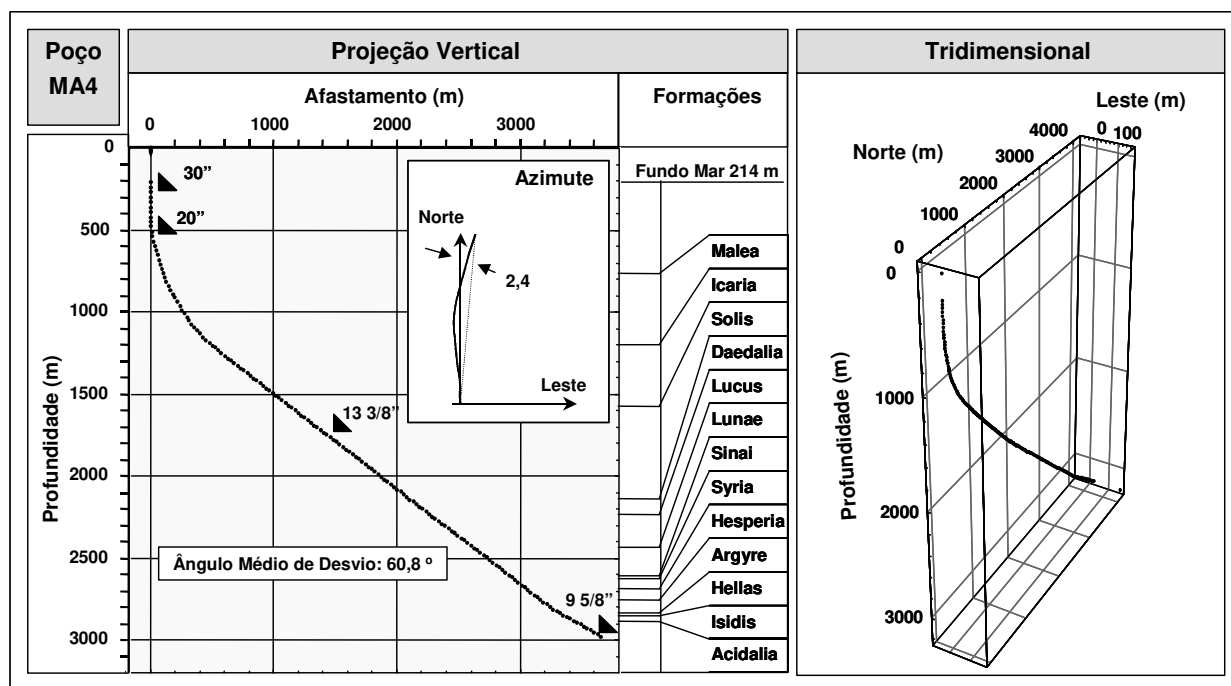


Figura 8.5: Esquema do poço MA4.

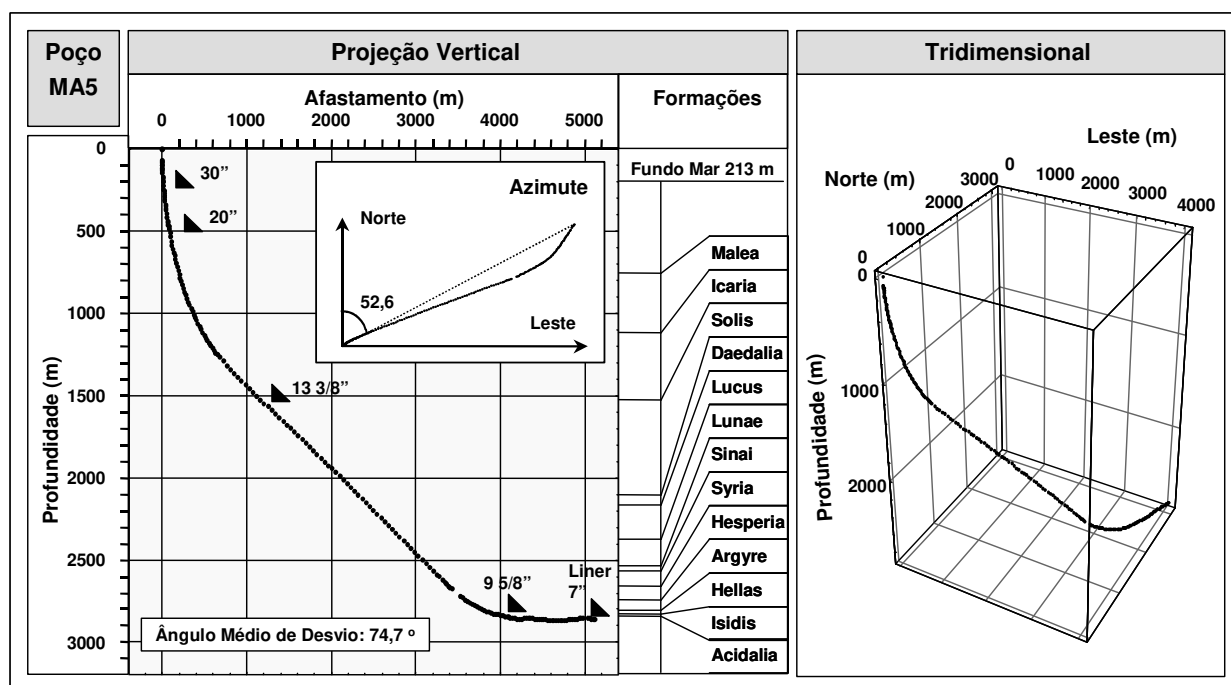


Figura 8.6: Esquema do poço MA5.

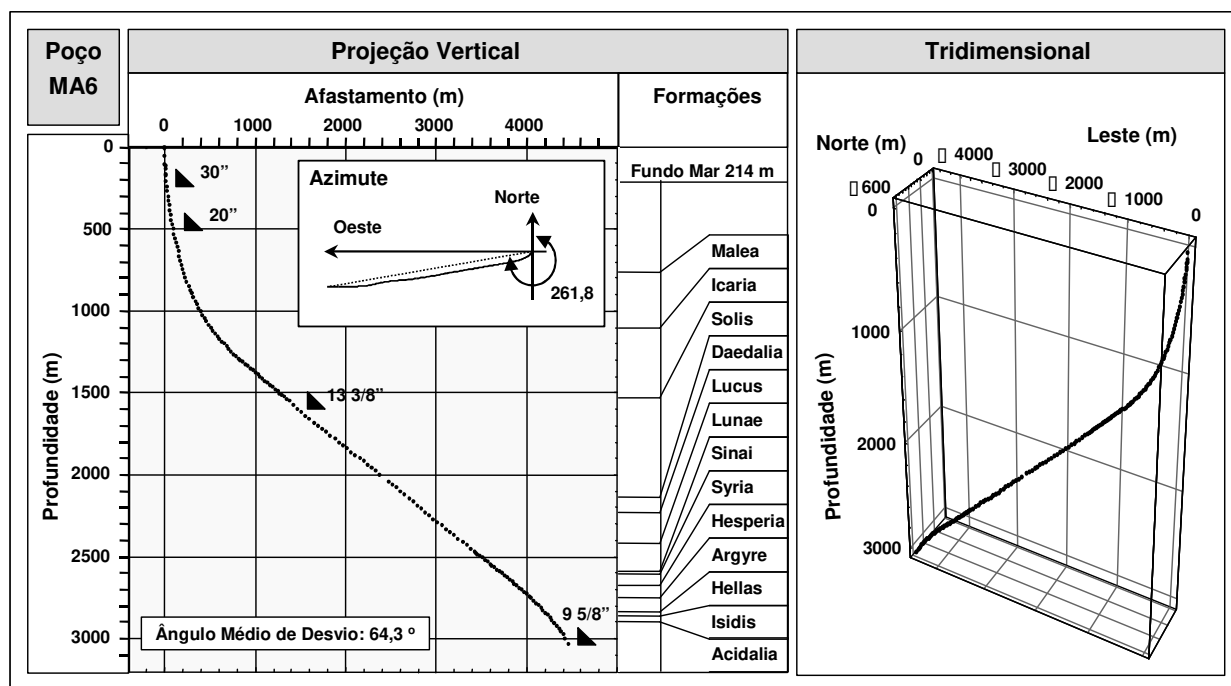


Figura 8.7: Esquema do poço MA6.

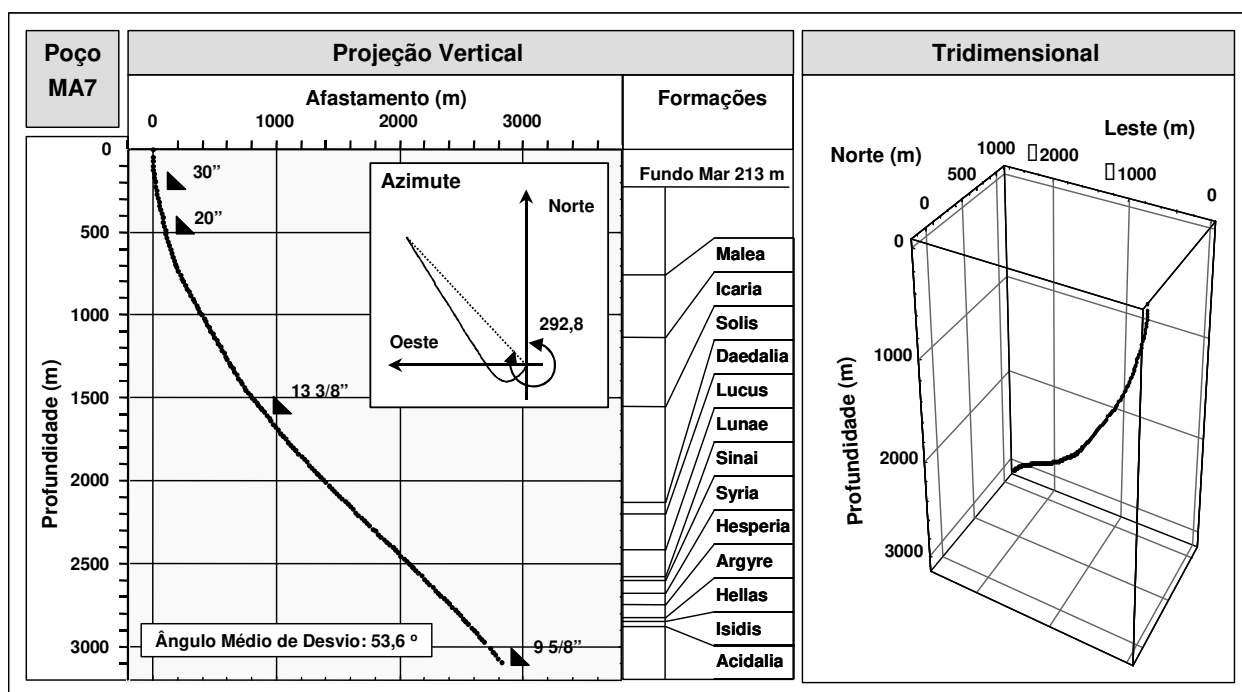


Figura 8.8: Esquema do poço MA7.

A seguir têm-se os parâmetros relacionados ao desempenho dos poços. Na Figura 8.9, são demonstrados os tempos totais para realização desses poços, assim como, os tempos perdidos com anormalidades. Na sequência — Figura 8.10 — têm-se as taxas de penetração obtidas.

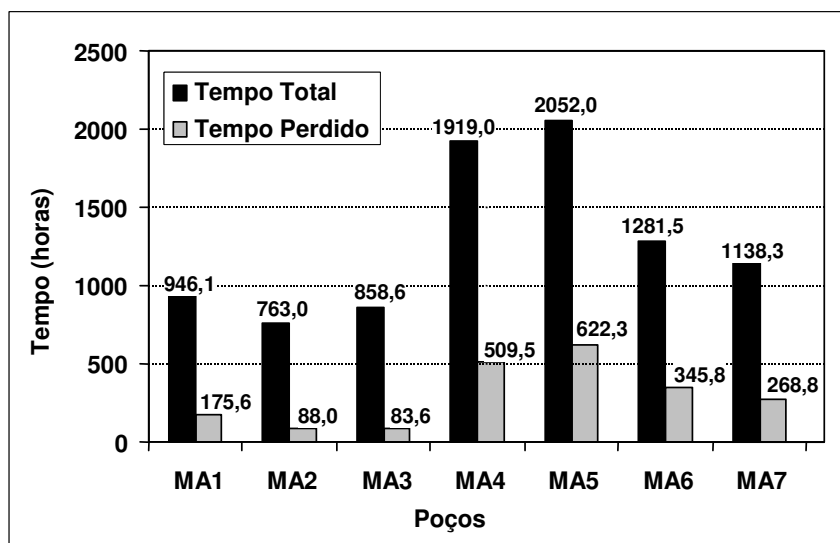


Figura 8.9: Tempos totais para realização dos poços e tempos perdidos com anormalidades.

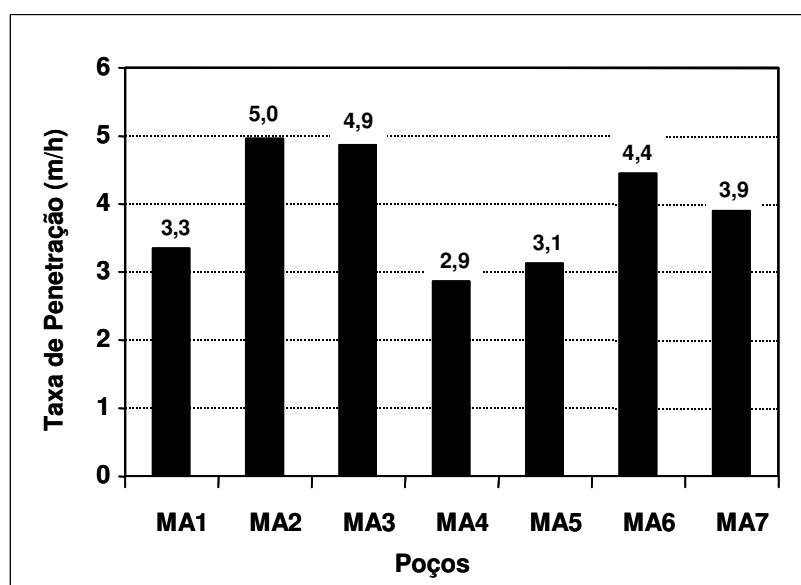


Figura 8.10: Taxas de penetração dos poços.

8.2 Indexação e Busca

Conforme discutido no **Capítulo 4**, deve-se indexar apropriadamente os poços na base de casos. Esta indexação vai permitir a identificação de poços, pelo processo de busca, os quais seriam mais adequados a um determinado projeto de poço. Na Tabela 8.1, estão os índices obtidos para os poços apresentados na seção anterior.

Tabela 8.1: Índices obtidos para os poços MA1, MA2, MA3, MA4, MA5, MA6, MA7.

		Índices						
Atributos	Termos	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6	MA7
Campo		Marte	Marte	Marte	Marte	Marte	Marte	Marte
Lâmina d'água	Rasa	0,46	0,46	0,47	0,46	0,47	0,46	0,47
	Média	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	Profunda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ultra Prof.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ângulo médio de desvio	Baixo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Médio	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Muito Alto	0,00	0,52	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00
Profundidade vertical	Raso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Médio	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
	Profundo	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Afastamento	Pequeno	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Médio	0,17	1,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,16
	Grande	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00	1,00	0,32
Azimute	Norte	0,00	0,61	0,72	0,97	0,42	0,00	0,75
	Leste	0,94	0,39	0,28	0,03	0,59	0,00	0,00
	Sul	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00
	Oeste	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,25

Assim, por exemplo, pela Tabela 8.1 o poço MA3 será representado pela seguinte 19-upla:

(Marte; 0,47; 0,12; 0; 0; 0; 0; 0; 0,95; 0; 0,44; 0,37; 0; 0,44; 0,02; 0,72; 0,28; 0; 0)

Um aspecto importante é que todos os poços foram perfurados numa mesma locação. Em termos de informações geológicas, esses poços são praticamente idênticos. O que os diferenciam são os atributos relacionados à trajetória, principalmente o azimute — veja as Figuras 8.2 a 8.8. Em

algumas situações, inclusive, tais atributos possuem valores muito próximos. Isso ocorre, por exemplo, quando comparamos os poços MA2 e MA3 — há uma diferença de apenas 10 graus. No entanto, mesmo nestas situações, as pequenas diferenças nos índices obtidos é suficiente para distingui-los. Assim, é possível afirmar que a metodologia proposta para a indexação é bastante sensível²⁷, permitindo uma boa caracterização dos casos, mesmo em situações onde os poços apresentam pouca diversidade entre si. Isso tem conseqüências benéficas na recuperação dos casos durante um processo de busca.

Em relação ao processo de busca — descrito no **Capítulo 5** — este é realizado em dois níveis. No primeiro nível, uma região do espaço de casos Ω é selecionada a partir de uma similaridade mínima requerida a um determinado projeto. O cálculo da similaridade entre caso e projeto é realizado com a Equação 5.6. No segundo nível, os casos no interior da região selecionada — esfera de similaridade — são analisados mais detalhadamente por meio de atributos mais específicos. Tais atributos são usados no cálculo de uma similaridade mais precisa, a qual foi denominada de similaridade total — calculada pela Equação 5.8. Como se dispõe de um número pequeno de poços para a realização de testes, optou-se em calcular a similaridade entre todos os poços afim de explorar um maior número de situações. Esses valores de similaridade estão nas Tabelas 8.3 e 8.4. Antes, na Tabela 8.2 estão os pesos adotados para os atributos no cálculo destas similaridades. Ressaltamos que tais pesos refletem uma ordem de prioridades a qual o usuário pode alterar.

²⁷ Na realidade esta sensibilidade pode ser ajustada através das funções de pertinência dos atributos de indexação.

Tabela 8.2: Pesos adotados para o cálculo das similaridades.

Atributos	Pesos
Campo	7
Lâmina d'água	1
Ângulo médio de desvio	2
Profundidade vertical	1
Afastamento	3
Azimute	2
Distância	1
Formações	5
Topos das formações	3
Espessura das formações	3

Tabela 8.3: Valores de similaridade entre os poços.

	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6	MA7
MA1	1,00	0,52	0,52	0,40	0,48	0,41	0,47
MA2	0,52	1,00	0,80	0,55	0,58	0,46	0,58
MA3	0,52	0,80	1,00	0,68	0,66	0,55	0,70
MA4	0,40	0,55	0,68	1,00	0,83	0,76	0,67
MA5	0,48	0,58	0,66	0,83	1,00	0,76	0,67
MA6	0,41	0,46	0,55	0,76	0,76	1,00	0,78
MA7	0,47	0,58	0,70	0,67	0,67	0,78	1,00

Tabela 8.4: Valores de similaridade total entre os poços.

	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6	MA7
MA1	1,00	0,70	0,69	0,66	0,71	0,67	0,67
MA2	0,70	1,00	0,82	0,72	0,74	0,67	0,69
MA3	0,69	0,82	1,00	0,74	0,72	0,67	0,82
MA4	0,66	0,72	0,74	1,00	0,69	0,81	0,70
MA5	0,71	0,74	0,72	0,69	1,00	0,66	0,65
MA6	0,67	0,67	0,67	0,81	0,66	1,00	0,73
MA7	0,67	0,69	0,82	0,70	0,65	0,73	1,00

Pela Tabela 8.3, se o poço MA3 fosse um projeto — ou melhor, se não tivéssemos tal poço a disposição, mas apenas seus atributos para a elaboração de um projeto — o processo de busca, no primeiro nível, identificaria os poços MA1, MA2, MA4, MA5, MA6 e MA7 com valores de similaridade de 0,52; 0,80; 0,68; 0,66; 0,55 e 0,70, respectivamente. Para facilitar a visualização, tais valores estão representados na forma gráfica na Figura 8.11.

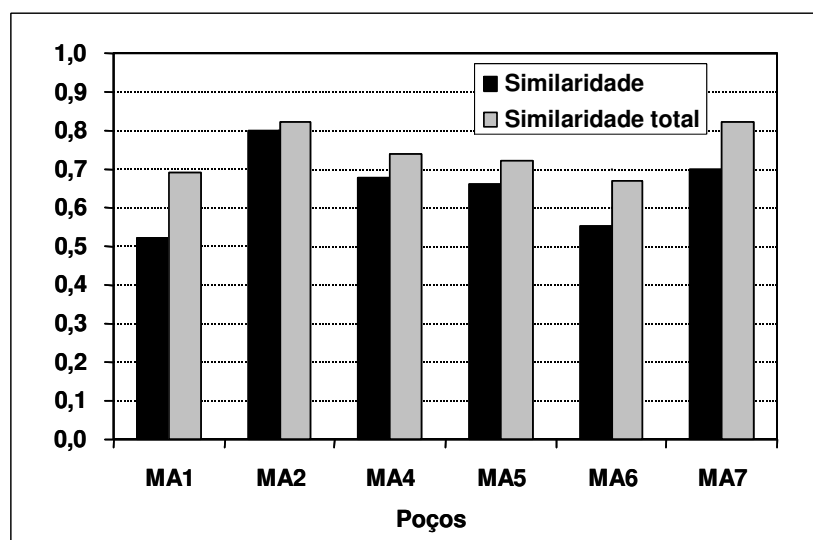


Figura 8.11: Valores de similaridade e similaridade total considerando o poço MA3 como projeto.

Se definirmos uma similaridade mínima de $\delta = 0,6$ todos esses poços seriam casos candidatos para a elaboração do projeto, exceto os poços MA1 e MA6 — os quais possuem similaridades com o projeto de apenas 0,52 e 0,55, respectivamente. No segundo nível — Tabela 8.4 e Figura 8.11 —, o processo de busca identificaria os poços MA2 e MA7 como os mais promissores, pois possuem uma similaridade total com o projeto de 0,82. Em seguida viriam os poços MA4 e MA5 com valores de similaridades totais de 0,74 e 0,72, respectivamente. A situação mais crítica ocorre quando consideramos o poço MA1 como projeto. Nesta situação, para o primeiro nível do processo de busca — Tabela 8.3 —, nenhum poço possui similaridade superior a 0,6. Isto ocorre porque o poço MA1, quando comparado com os demais, possui o menor afastamento e ângulo médio de desvio. Realizando este tipo de análise para os outros poços, verifica-se que os dados das Tabelas 8.3 e 8.4 estão consistentes com as informações apresentadas nas Figuras 8.2 a 8.8. Lembramos que na elaboração do projeto, o processo de busca também pode ser realizado visando estudos específicos. Nestes estudos alguns atributos não são importantes ou possuem uma importância reduzida quando comparados a outros atributos. Desta forma, os pesos podem ser ajustados para refletir uma determinada ordem de prioridades. Ou seja, a metodologia proposta permite realizar buscas dedicadas para diversos tipos de análise.

8.3 Adaptação

De acordo com nossa discussão no **Capítulo 6**, o processo de adaptação deve ajustar, quando necessário, as informações contidas nos casos recuperados — pelo processo de busca — para que possam ser aplicadas ao projeto. Para isso é necessário identificar quais os casos mais relevantes ao projeto — medida esta dada pela Equação 6.1. Para o cálculo da relevância, foi adotada a mesma estratégia utilizada nos cálculos de similaridades da seção anterior. Ou seja, calculou-se a relevância entre os todos poços afim de obter uma melhor amostragem do comportamento desta medida. Os resultados estão na Tabela 8.6 — onde as linhas correspondem aos poços considerados como casos e as colunas aos poços considerados como projeto durante o cálculo. Ainda, na Tabela 8.5, estão os pesos adotados para os parâmetros no cálculo da relevância. Para os cálculos da severidade nas anormalidades e taxa de penetração foram utilizados, respectivamente, os dados das Figuras 8.9 e 8.10. Lembramos que todos os poços foram perfurados dentro do intervalo de 1 ano.

Tabela 8.5: Pesos adotados para o cálculo da relevância.

Parâmetros	Pesos
Idade do poço	1
Severidade nas anormalidades	3
Taxa de Penetração	5
Similaridade total	8

Tabela 8.6: Valores de relevância entre os poços.

Projetos Casos	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6	MA7
MA1		0,65	0,65	0,63	0,66	0,64	0,64
MA2	0,84		0,89	0,86	0,86	0,83	0,84
MA3	0,85	0,91		0,88	0,87	0,84	0,92
MA4	0,47	0,50	0,51		0,49	0,55	0,49
MA5	0,52	0,53	0,52	0,51		0,50	0,49
MA6	0,69	0,69	0,69	0,76	0,69		0,72
MA7	0,70	0,71	0,78	0,72	0,70	0,73	

Pela Tabela 8.6, observa-se que nem sempre o caso mais similar a um dado projeto é o mais relevante. Por exemplo, se considerarmos o poço MA6 como projeto o caso mais promissor — em termos de similaridade — é o poço MA4 com um valor 0,81 — veja Tabela 8.4. Entretanto, pela medida de relevância o caso mais promissor é o poço MA3 com um valor de 0,84. Isso ocorre, porque, apesar do poço MA4 ser o mais similar, ele apresenta problemas com anormalidades²⁸ e — também em consequência disso — uma baixa taxa de penetração. Em outra situação, considerando agora o poço MA3 como projeto, os casos mais promissores em ordem de relevância são os poços MA2, MA7, MA6, MA1, MA5 e, por fim, o MA4 com valores de relevância de 0,89; 0,78; 0,69; 0,65; 0,52 e 0,51; respectivamente. Para facilitar a visualização, estes valores estão ilustrados na forma gráfica na Figura 8.12.

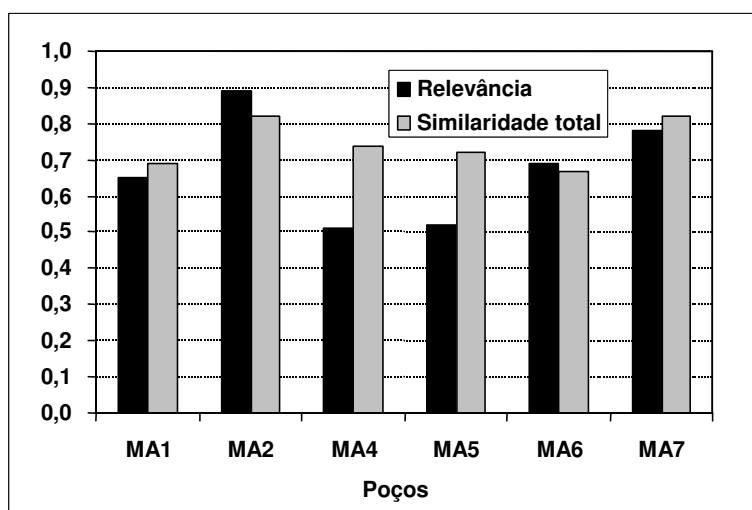


Figura 8.12: Valores de relevância e similaridade total, considerando o poço MA3 como projeto.

Note que novamente o poço MA4 está entre os mais similares ao projeto, entretanto, é o último em ordem de relevância. Isso não significa que tal poço deva ser menosprezado. De acordo com a hipótese levantada no **Capítulo 6**, podem haver casos com baixa relevância, no entanto, com

²⁸ Este poço apresentou sérios problemas com prisão de coluna, provavelmente ocasionada por diferencial de pressão, a 2913 metros de profundidade vertical (4855 metros de profundidade medida).

informações adequadas ao projeto. Tais informações estariam em partes relevantes do caso, contudo, devido às partes menos relevantes, o caso como um todo teria uma baixa medida de relevância — provavelmente isto está acontecendo com o poço MA4.

Para confirmar tal hipótese e ilustrar a otimização da medida de relevância, aplicaremos o algoritmo genético descrito no **Capítulo 6** nesta situação. Ou seja, vamos considerar o poço MA3 como projeto e os outros poços como a população inicial do algoritmo. Assim, para tal, os poços da população inicial foram divididos em trechos-poço — lembrando que cada trecho-poço corresponde a um gene. Na Tabela 8.7, estão os topos e as bases destes trechos²⁹.

Tabela 8.7: Topos e bases dos trechos-poço utilizados na representação genéticos dos poços.

Genes	Topo e Base (metros)											
	MA1		MA2		MA4		MA5		MA6		MA7	
#	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
1	184,0	239,1	210,0	239,1	184,0	239,0	110,0	236,9	184,5	235,5	180,0	234,2
2	239,1	493,4	239,1	494,4	239,0	506,6	236,9	497,9	235,5	497,0	234,2	493,8
3	493,4	750,0	494,4	726,0	506,6	621,3	497,9	755,0	497,0	762,3	493,8	756,3
4	750,0	1133,0	726,0	754,0	621,3	761,8	755,0	1116,1	762,3	1106,8	756,3	1117,3
5	1133,0	1521,5	754,0	1136,8	761,8	1197,5	1116,1	1523,9	1106,8	1272,2	1117,3	1583,0
6	1521,5	1801,0	1136,8	1525,8	1197,5	1568,4	1523,9	1576,9	1272,2	1533,8	1583,0	2132,0
7	1801,0	2099,8	1525,8	1687,5	1568,4	1718,6	1576,9	2103,1	1533,8	1717,9	2132,0	2202,0
8	2099,8	2196,4	1687,5	1798,8	1718,6	1943,6	2103,1	2165,0	1717,9	2141,1	2202,0	2414,6
9	2196,4	2241,0	1798,8	2101,7	1943,6	2077,4	2165,0	2370,1	2141,1	2232,5	2414,6	2580,5
10	2241,0	2375,0	2101,7	2184,8	2077,4	2136,0	2370,1	2534,2	2232,5	2422,3	2580,5	2601,8
11	2375,0	2535,7	2184,8	2381,1	2136,0	2234,3	2534,2	2565,2	2422,3	2589,0	2601,8	2680,3
12	2535,7	2567,8	2381,1	2554,0	2234,3	2435,2	2565,2	2657,0	2589,0	2604,8	2680,3	2745,8
13	2567,8	2651,5	2554,0	2592,6	2435,2	2611,0	2657,0	2742,8	2604,8	2679,1	2745,8	2827,6
14	2651,5	2737,7	2592,6	2652,6	2611,0	2700,0	2742,8	2805,0	2679,1	2749,0	2827,6	2848,3
15	2737,7	2795,3	2652,6	2727,7	2700,0	2925,0	2805,0	2824,3	2749,0	2840,4	2848,3	2881,6
16	2795,3	2814,9	2727,7	2793,6	2925,0	3015,4	2824,3	2856,9	2840,4	2860,9	2881,6	3094,0
17	2814,9	2838,4	2793,6	2813,8	3015,4	3116,2			2860,9	2893,0		
18	2838,4	2904,7	2813,8	2839,9	3116,2	3195,6			2893,0	3031,2		
19	2904,7	3011,2	2839,9	2933,7								
20			2933,7	2991,7								
21			2991,7	3048,1								

²⁹ Para divisão dos poços em trechos-poço foram adotados os critérios discutidos na seção 6.2.2, exceto no intervalo do poço MA4 onde houve prisão de coluna — a aproximadamente 2900 m de profundidade — o qual foi incluído em um mesmo trecho-poço.

Na Tabela 8.8 têm-se os tempos totais para a realização de cada trecho, assim como, os tempos perdidos com anormalidades nestes trechos. Esses valores de tempos serão utilizados nos cálculos da severidade nas anormalidades. Para o cálculo do parâmetro taxa de penetração foram adotados os valores 2,5 m/h e 4,0 m/h — os quais correspondem respectivamente a T_1 e T_2 conforme discutido na seção 6.1.

Tabela 8.8: Tempos totais e perdidos com anormalidades em cada trecho-poço.

G.	Tempo (horas)											
	MA1		MA2		MA4		MA5		MA6		MA7	
#	Total	Perd.	Total	Perd.	Total	Perd.	Total	Perd.	Total	Perd.	Total	Perd.
1	23,0	0,5	20,7	0,0	21,3	0,8	29,2	2,3	61,3	0,5	50,99	0,8
2	17,2	0,0	18,8	0,0	29,8	14,8	22,0	2,5	2,2	0,0	56,3	22,0
3	69,3	8,8	87,6	1,0	81,7	1,3	107,1	10,8	132,6	66,0	118,8	88,8
4	10,7	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	19,0	0,0	7,5	7,5	14,1	0,0
5	25,5	1,0	6,5	0,0	49,7	1,8	27,9	0,0	21,3	15,0	14,6	0,3
6	8,3	1,0	4,4	0,0	29,7	0,0	93,7	7,0	25,8	0,3	205,5	14,8
7	123,0	29,0	21,1	1,5	20,1	0,0	58,5	39,8	125,4	14,0	3,0	0,0
8	31,7	20,8	6,0	2,8	189,0	15,5	33,8	28,5	52,9	0,5	18,5	0,3
9	17,8	17,8	116,4	7,0	30,7	19,3	22,9	22,0	60,8	48,5	99,7	46,3
10	0,2	0,0	6,6	0,0	13,5	0,0	15,5	13,3	56,6	29,0	3,3	0,0
11	7,0	0,5	15,5	0,0	17,8	0,0	8,0	8,0	113,6	31,8	9,7	0,0
12	2,7	0,0	2,7	0,0	22,2	0,0	12,4	10,5	4,3	0,0	0,2	0,0
13	5,6	0,0	0,4	0,0	10,3	0,0	129,3	43,8	17,7	2,3	15,7	14,0
14	0,3	0,0	0,6	0,0	0,9	0,0	73,0	199,3	7,4	1,3	3,4	0,0
15	6,9	0,5	0,7	0,0	534,8	275,7	49,7	0,3	15,4	0,0	12,0	4,5
16	0,3	0,0	8,6	1,3	110,8	7,3	1349,8	414,0	0,4	0,0	512,7	153,8
17	0,4	0,0	5,5	0,0	16,6	1,0			12,4	0,5		
18	60,5	11,5	0,3	0,0	739,5	172,3			566,2	128,8		
19	538,3	84,3	8,0	0,8								
20			70,8	19,8								
21									361,5	54,0		

Ajustou-se o algoritmo genético para que o operador de *crossover* seja aplicado a 90% dos indivíduos da população — taxa de *crossover* = 0,9. O desempenho obtido com o algoritmo está ilustrado na Figura 8.13. Tal figura mostra, para cada geração, o valor da relevância do melhor indivíduo da população, além do valor médio de relevância de todos os indivíduos desta população.

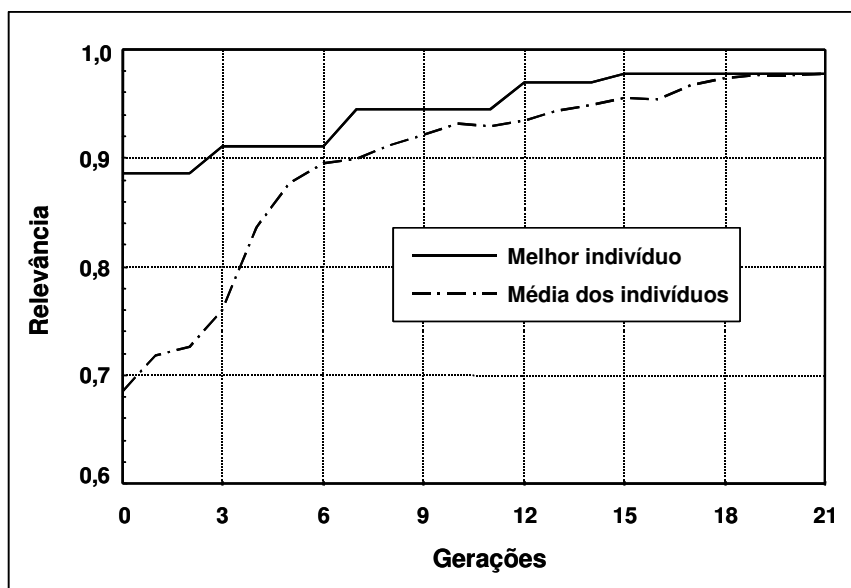


Figura 8.13: Desempenho do algoritmo genético.

Como pode ser observado, o algoritmo converge com 21 gerações — nesta geração 100% dos cromossomos estão representando o mesmo indivíduo. Na geração inicial, como esperado, o melhor indivíduo é o poço MA2 com valor de relevância de 0,89. Já na última geração, a vigésima primeira, temos uma significativa melhora com um indivíduo o qual possui um valor de relevância de 0,98. Tal indivíduo é composto pelos seguintes genes:

Gene1PoçoMA2, Gene2PoçoMA2, Gene3PoçoMA2, Gene4PoçoMA2, Gene5PoçoMA2, Gene6PoçoMA2, Gene7PoçoMA2, Gene8PoçoMA2, Gene8PoçoMA4, Gene9PoçoMA4, Gene10PoçoMA4, Gene11PoçoMA4, Gene12PoçoMA4, Gene13PoçoMA4, Gene13PoçoMA2, Gene14PoçoMA2, Gene15PoçoMA2, Gene16PoçoMA2, Gene17PoçoMA2, Gene14PoçoMA7, Gene15PoçoMA7, Gene21PoçoMA2.

Para uma melhor visualização, este indivíduo foi ilustrado na Figura 8.14. Destacamos que apesar da figura representar somente aspecto de trajetória, lembramos que cada trecho-poço carrega consigo todas as informações pertinentes a sua perfuração, tais como, brocas, fluidos de perfuração, anormalidades, pressão de poros, pressão de fratura, revestimentos, etc.

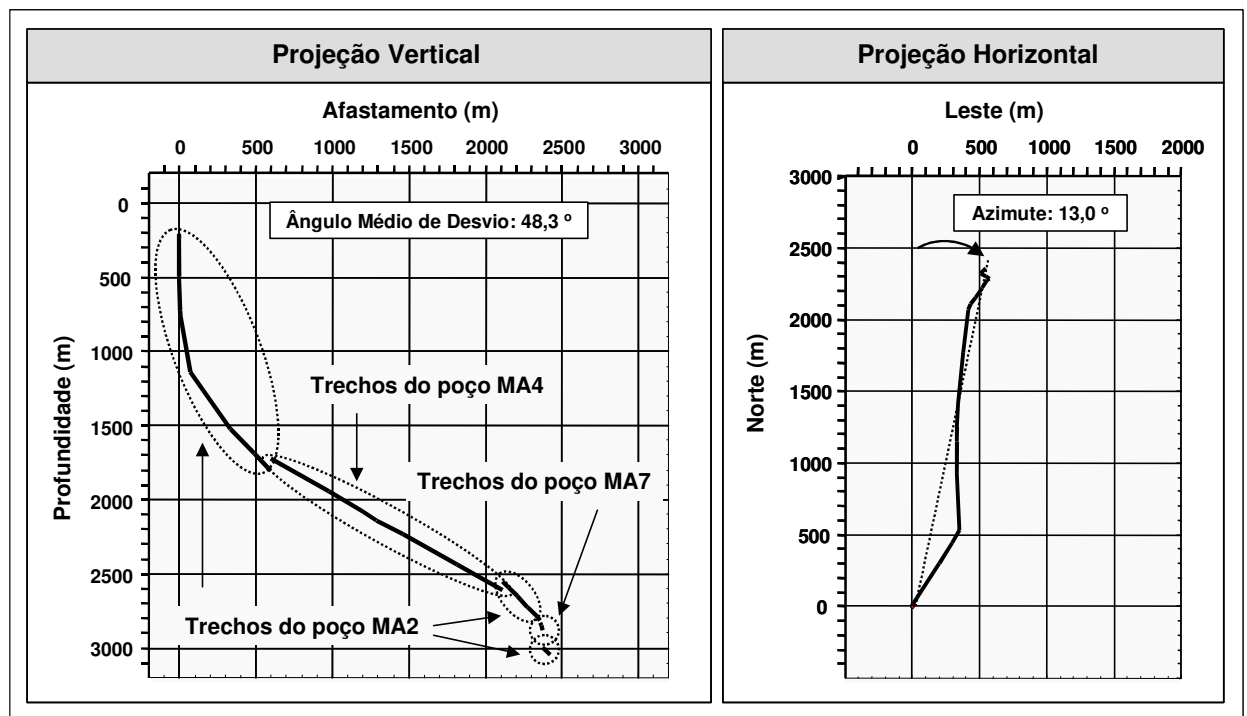


Figura 8.14: Indivíduo — com valor relevância 0,98 — gerado pelo algoritmo genético após 21 gerações.

Observe que esse novo indivíduo recebe contribuições dos poços MA2, MA7 e, inclusive, o poço MA4. Esse resultado confirma nossa hipótese, mostrando que poço MA4, apesar de possuir uma baixa relevância, pode dar uma contribuição significativa ao projeto. Os resultados também mostram que o algoritmo genético conseguiu melhorar a situação inicial em aproximadamente 10% e 40% em relação, respectivamente, ao valor de relevância do melhor indivíduo e da média dos indivíduos. Tais resultados são muito bons, se ponderarmos que o algoritmo genético empregado torna-se particularmente interessante quando existe uma certa diversidade entre os casos. De um modo geral, os poços utilizados nos testes são bastante similares entre si, caracterizando assim, uma situação de pouca diversidade.

A próxima etapa seria o dimensionamento do projeto tendo como ponto de partida o poço gerado pelo algoritmo genético. Conforme discutido no **Capítulo 6**, neste dimensionamento o usuário pode empregar aplicativos e simuladores operacionais disponíveis comercialmente ou ainda

algoritmos computacionais desenvolvidos pelo próprio usuário³⁰. Como essas são técnicas bastante difundidas e documentadas na indústria do petróleo elas não foram abordadas neste trabalho. No entanto, a título de exemplo, na Figura 8.15 estão algumas informações utilizadas no dimensionamento — pressões de poros próximo a formação produtora e o esquema de revestimentos.

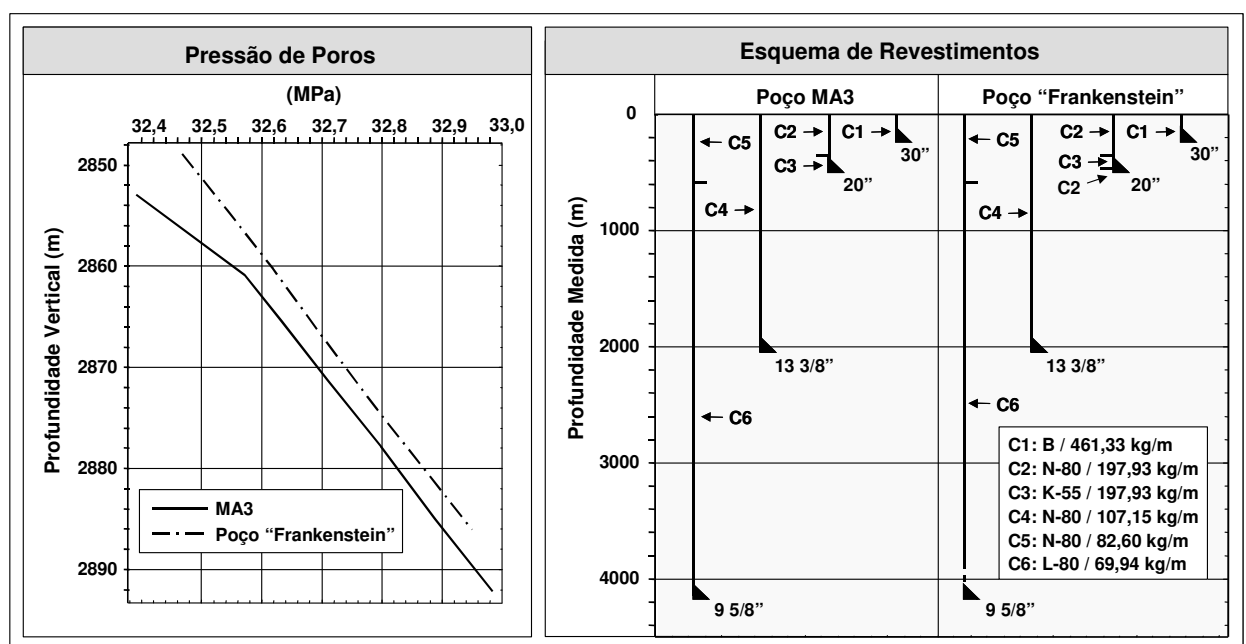


Figura 8.15: Pressões de poros e esquemas de revestimentos para os poços “Frankenstein” e MA3.

Na Figura 8.15 podemos comparar as pressões de poros sugeridas pelo poço gerado pelo algoritmo genético — poço “Frankenstein” — com as pressões que foram efetivamente obtidas no poço MA3 — poço projeto. Nesta figura também podemos comparar os esquemas de revestimentos destes poços, ou seja, o esquema de revestimentos sugerido pelo poço “Frankenstein” com o esquema utilizado no poço MA3. Note que as informações sugeridas pelo

³⁰ Espera-se que tais *softwares* estejam integrados ao WellCase, compondo assim, um ambiente com informações consolidadas de projetos anteriores com aplicativos os quais o usuário já estaria familiarizado.

poço “Frankenstein” estão bastante coerentes com as informações do poço MA3. Trataremos a seguir do processo de armazenamento.

8.4 Armazenamento

Para o processo de armazenamento, conforme discutido no **Capítulo 7**, sugere-se a utilização de curvas de aprendizado. Tais curvas auxiliariam em avaliações macroscópicas, permitindo identificar pontos problemáticos nos poços candidatos ao armazenamento. Com a identificação desses pontos pode-se — numa segunda etapa — realizar uma análise mais aprofundada. Nesta seção buscaremos ilustrar, de forma geral, o potencial de aplicação da curva de aprendizado como ferramenta auxiliar de análise. No momento, não é nosso propósito um estudo detalhado dos problemas da perfuração.

Para a utilização da curva de aprendizado, primeiro deve-se selecionar um conjunto de poços similares ao poço candidato ao armazenamento. Posteriormente, os poços são agrupados apropriadamente para a construção do gráfico. Para ilustrar tal procedimento escolheu-se o poço MA7 como candidato ao armazenamento. Como critério para a escolha dos poços similares, adotou-se o valor mínimo de 0,7 para a similaridade total. Com tal valor, selecionamos os poços MA3, MA4 e MA6 — veja Tabela 8.4. Na Figura 8.16, tem-se a curva de aprendizado para o tempo total de realização dos poços. Nesta figura também temos as curvas para quatro atividades específicas e uma abrangendo o restante das atividades, a saber: problemas com ocorrências anormais, perfuração, descida e cimentação das colunas de revestimento, instalação do *BOP*³¹ e outras atividades. Para evitar que os resultados sejam mascarados por diferenças nas profundidades — mesmo que pequenas — as curvas foram normalizadas pelas respectivas profundidades medidas dos poços.

³¹ *BOP*: abreviatura de *blowout preventer*. Equipamento de segurança composto por um conjunto de válvulas que permitem o fechamento do poço.

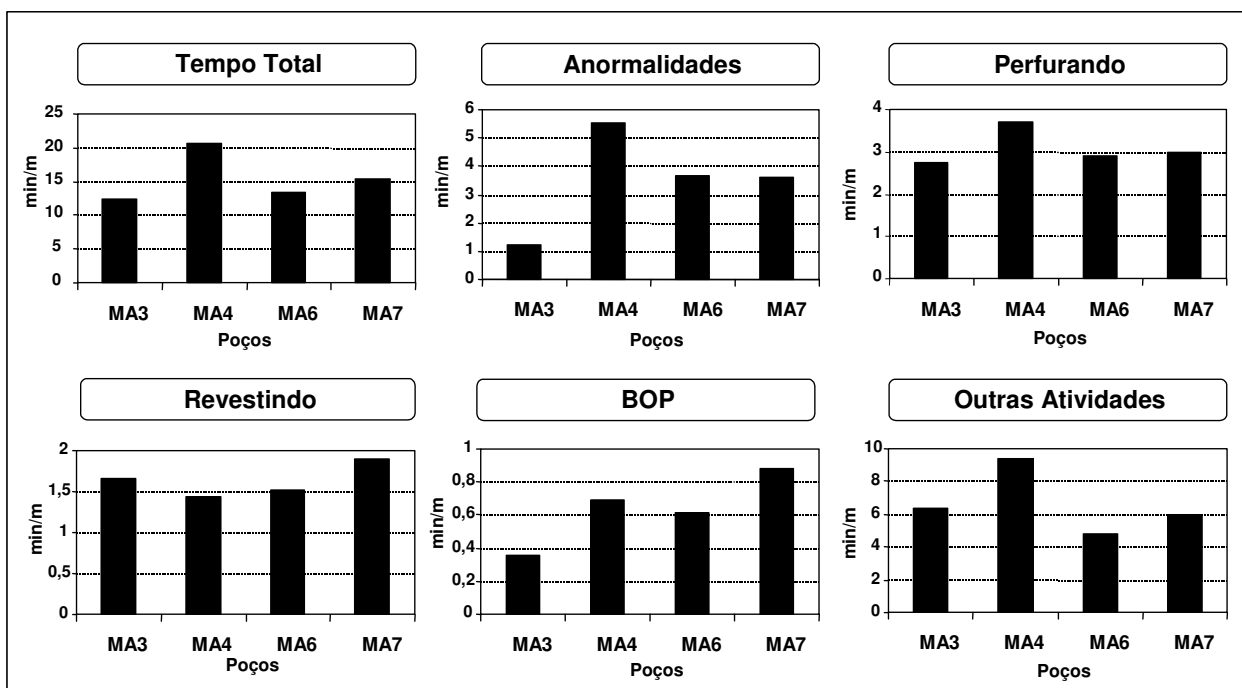


Figura 8.16: Curvas de aprendizado para atividades específicas.

Os gráficos da Figura 8.16 mostram que o poço MA7 não proporciona aprendizado nas atividades tratadas. Inclusive, pode-se destacar duas atividades críticas: a descida e cimentação das colunas de revestimento e instalação do *BOP*. Tais atividades merecem estudos mais detalhados para identificar as causas da perda de “aprendizado”. Em relação à perfuração, o poço possui um desempenho satisfatório, entretanto, não traz uma melhora significativa, quando comparado ao poço anterior da sequência — MA6. O mesmo comportamento pode ser observado com respeito às anormalidades e outras atividades.

Com essa avaliação, mesmo sendo superficial, pode-se concluir que o poço não deve ser armazenado. Este exemplo ilustra bem o propósito da ferramenta. A curva de aprendizado permite, com uma rápida análise, identificar pontos problemáticos. Uma vez identificados tais pontos, deve-se dispor de outros processos de investigação específicos para os problemas apontados. Entretanto, identificando-se ou não as causas de tais problemas, é importante relatar

essas informações no caso — ou casos — que deram origem ao poço problemático. Essas informações servem de alerta para os poços futuros.

Capítulo 9

Conclusões

O estudo realizado neste trabalho representa uma iniciativa de modelar uma arquitetura baseada em casos para o contexto da perfuração de poços de petróleo. Procurou-se formalizar os principais conceitos envolvidos e ilustrar o potencial de aplicação na área de projetos de poços. Deste estudo, destacamos os seguintes pontos:

- A arquitetura proposta agiliza a elaboração do projeto de poços de petróleo, pois permite tanto reaproveitar projetos anteriores como prevenir falhas potenciais para os novos projetos. Isto promove uma evolução mais rápida nos projetos de perfuração com perspectivas de maior segurança e custos menores. Além disso, como a arquitetura trabalha calcada em situações que efetivamente ocorreram, isso possibilita a elaboração de projetos mais próximos da necessidade real;
- Outro ponto é a manutenção do conhecimento em termos da corporação. Neste aspecto, a arquitetura parece proporcionar um caminho promissor, pois armazena — de maneira organizada — experiências prévias, evitando que se percam e permite o seu fácil acesso para aplicações futuras;
- A arquitetura permite que o usuário altere, ou mesmo acrescente, novos atributos e parâmetros, tanto para os processos de indexação e busca, como no cálculo da relevância.

Esta observação também vale para os pesos associados a tais atributos e parâmetros. Desta forma, pode-se configurar o sistema conforme as necessidades de cada região;

- Para novatos na área de projetos de poços de petróleo, o sistema construído com a arquitetura proposta pode fornecer a experiência que eles ainda não possuem. Ou seja, essa ferramenta também seria adequada para o treinamento de novos engenheiros de perfuração;
- Em relação à metodologia aplicada na indexação e recuperação de casos, destacamos que os poços de petróleo contêm uma quantidade muito grande de informações quantitativas. Por causa disso, o gerenciamento desses poços numa base de casos torna-se bastante complexo. A utilização da teoria de conjuntos nebulosos diminui essa complexidade à medida em que transforma informações quantitativas em qualitativas — por meio de variáveis lingüísticas. Assim é possível utilizar essas variáveis para indexar os poços na base de casos, tornando mais rápido o acesso às categorias de poços em que estejamos interessados;
- Em relação à metodologia aplicada na adaptação dos casos, o algoritmo genético mostrou-se eficiente na otimização da medida de relevância — mesmo numa situação de pouca diversidade entre os casos. Lembramos que neste trabalho foram utilizados seis poços para a população inicial do algoritmo genético. É difícil dizer quais são os números ideal e mínimo de poços para se aplicar o algoritmo genético. Mas é possível afirmar que o desempenho do algoritmo tende a melhorar com o aumento do número de poços;
- No processo de armazenamento, a preocupação estava em ilustrar o potencial de aplicação das curvas de aprendizado como ferramenta de análise. Nos testes realizados, a ferramenta mostrou ser capaz de apontar pontos problemáticos nos poços. Num segundo momento, através do uso de ferramentas mais apropriadas, pode-se buscar as causas dos problemas apontados;
- Além da aplicação na elaboração do projeto de poços, verificamos que a arquitetura proposta mostra-se muito promissora para estudos comparativos de dados de perfuração.

Sugestões para trabalhos futuros:

- No processo de adaptação, a utilização do algoritmo genético é uma primeira abordagem para o problema. Ela abre a possibilidade de trabalhos futuros explorarem outros tipos de algoritmos genéticos, ou mesmo, outras abordagens evolutivas;
- Ainda no algoritmo genético, foi utilizado o ângulo de *dog-leg* como parâmetro de penalização daqueles indivíduos que apresentavam mudanças bruscas em suas trajetórias. Os indivíduos que possuíam ângulos de *dog-leg* acima ou igual a um valor máximo foram penalizados. Seria interessante o mapeamento desta tolerância utilizando-se a teoria de conjuntos nebulosos;
- Para o cálculo da relevância foi utilizado um parâmetro para anormalidades. Como mencionado anteriormente, a medida proposta é uma aproximação grosseira do ideal. No entanto, como o estudo das anormalidades é um problema bastante complexo, creio que deva ser tratado em um trabalho específico;
- A abrangência da arquitetura permite a inclusão de outros processos. Por exemplo, para a etapa de execução do projeto, pode-se pensar no desenvolvimento de um processo para o acompanhamento das operações de perfuração. Tal processo faria o monitoramento de alguns parâmetros para verificar as condições do poço. Desta forma, seria possível — durante a perfuração — alertar com certa antecedência um possível problema;
- Neste trabalho, estávamos preocupados em formalizar e validar a arquitetura proposta. Para isto foi implementado um protótipo. Uma continuação deste trabalho, seria estudar uma implementação mais completa da arquitetura, com interfaces amigáveis afim de facilitar sua utilização pelo usuário;
- Por fim, trabalhos futuros poderiam estudar a aplicação de técnicas de “mineração de dados”³², para a obtenção dos vários pesos utilizados na arquitetura. Antecipamos que seria necessário uma base de dados mais abrangente.

³² Proveniente da expressão original inglês, *data mining*: campo de pesquisa preocupado com a extração de informações relevantes a partir de uma base de dados.

Referências Bibliográficas

AADNOY, B.S. *Modern well design*. Gulf Publishing Company, Houston, 1997. 238p.

ADAMS, N.J. *Drilling engineering. A complete well planning approach*. PennWell Publishing Company, Tulsa, 1985. Cap.1: Introduction to well planning, p.1-8.

ASHER, H. Cost-quality relationships. In: the Airframe Industry R-291, Santa Monica, California, The Rand Corporation, July 1956.

BOURGOYNE, A.T.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNG, F.S. *Applied drilling engineering*. SPE Textbook Series, v.2, USA, 1986. 502p.

BRAUNSCHWEIG, B.; DAY, R. *Artificial intelligence in the petroleum industry. Symbolic and computational applications*. Paris, Éditions Technip, 1995. 460p.

BRETT, J.F.; MILLHEIM, K.K. The drilling performance curve: a yardstick for judging drilling performance. In: Annual Technical Conference and Exhibition of The Society of Petroleum Engineers, New Orleans, SPE 15362, 10, 1986.

DARWIN, C. *The origin of species*. John Murray, 1859 (Penguin Classics, 1985).

Expert systems in engineering applications. Published by the Society of Petroleum Engineers – SPE, No. 41, 1996.

FEAR, M.J.; MEANY, N.C; EVANS, J.M. An expert system for drill bit selection. In: IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, SPE 27470, 2, 1994.

FRASER, A.S. Simulation of genetic systems by automatic digital computer: I introduction. *Austral. J. Biol. Sci*, 1957, v.10, p.484-491.

FREITAS, R.L. *Um sistema de planejamento de ações baseado em casos para uma célula flexível de manufatura*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996, p.215-217.

GOLDBERG, D.E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, 1989. 412p.

GRAHAM, C.H., GANE, R.M. The Acquisition, Extinction, and Spontaneous Recovery of Conditioned Operant Response. *Journal of Experimental Psychology*, 1940, n.26, p.241-280.

HOLLAND, J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J.H. Outline for a logical theory of adaptive systems. *J. Assoc. Comput. Mach*, 1962, v.3, p.297-314.

KOLODNER, J.L. *Case-based reasoning*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1993.

- KOSKO, B. *Fuzzy engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, New Jersey, 1997.
Cap.12: Fuzzy cubes and fuzzy mutual entropy, p.403-426.
- KOSKO, B. *Neural networks and fuzzy systems. A dynamical systems approach to machine intelligence*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992. 449p.
- LEAKE, D.B. *Case-based reasoning: experiences, lessons, & future directions*. Menlo Park: AAAI: MIT, 1996. 420p.
- MENDES^(a), J.R.P.; GUILHERME, I.R.; MOROOKA, C.K. Case-based system: indexing and retrieval with fuzzy hypercube. In: Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS international conference, 7, Vancouver, 2001.
- MENDES^(b), J.R.P.; GUILHERME, I.R.; MOROOKA, C.K. Sistema inteligente para análise de brocas tricônicas em poços de petróleo. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 11, Uberlândia, Brasil, 2001.
- MENDES^(c), J.R.P.; MOROOKA, C.K.; GUILHERME, I.R.; FONSECA, T.C.; TAVARES, R.M. Fuzzy numbers and kick tolerance for determination of casing setting depth. In: 22nd Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering and 2nd Brazilian Congress on Computational Mechanics. 11, Campinas, Brazil, 2001.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. 3rd edition. Springer-Verlag, 1996. Cap.5: Binary or float?, p.97-106.
- MINSKY, M. A framework for representing knowledge. *The Psychology of Computer Vision*, P. Winston, New York, Mc Graw-Hill, 1975.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. *A introduction to fuzzy sets. Analysis and design*. MIT Press, London, 1998. Cap.7: Linguistic variables, p.165-180.

ROQUE, J.L. *Dimensionamento de revestimentos para poços profundos, poços direcionais e horizontais de longo afastamento horizontal pelo método do mínimo custo global*. Campinas, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1992. 106p. Tese (Mestrado).

SADEGH-ZADEH^(a), K. Advances in fuzzy theory. *Artificial Intelligence in Medicine*, 1999, v.15, p.309-323.

SADEGH-ZADEH^(b), K. Fundamentals of clinical methodology: 3. Nosology. *Artificial Intelligence in Medicine*, 1999, v.17, p.87-108.

SADEGH-ZADEH, K. Fuzzy genomes. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2000, v.18, p.1-28.

SANTARELLI, F.J.; ZAHO, S.; BURRAFATO, G.; ZAUSA, F.; GIACCA, D. Wellbore stability analysis made easy and practical. In: IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, SPE 35105, 3, 1996.

SATO, A.T. *Sistema inteligente para elaborar um projeto de perfuração de um poço de petróleo*. Campinas, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1992. 106p. Tese (Mestrado).

SHORT, J.A. *Drilling. A source book on oil and gas well drilling from exploration to completion*. PennWell Publishing Company, Tulsa, 1983. Cap.4: Drilling prospects, programs & procedures, p.117-167.

- THORNDIKE, E.L. Animal intelligence: An experimental study of the association process in animals. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 1898, n.2, p.1-109.
- THURSTONE, L.L. The learning curve equation. *Psychological Monograph*, 1919, n.26, p.1-51.
- WRIGHT, T. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of Aeronautical Science*, 1936, n.3, p.122-128.
- ZADEH, L.A. Fuzzy sets. *Information and control*, 1965, v.8, p.338-353.
- ZADEH, L.A. The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 1975, v. 8, p. 199-249 (part I); v.8, p.301-357 (part II).
- ZADEH, L.A. Toward a theory of fuzzy systems. In: *Aspects of Network and System Theory*, 1971, ed. R. E. Kalman and N. De Claris, New York: Holt, Rinehart and Winston, p.469-490.