



CENTRO UNIVERSITÁRIO VILA VELHA - UUV
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

MARIZE LYRA SILVA PASSOS

***TÉCNICA PARA SELEÇÃO DE POÇOS CANDIDATOS À PERFURAÇÃO
UNDERBALANCED: BASEADA EM UM MÉTODO DE AUXÍLIO À DECISÃO POR
MÚLTIPLOS CRITÉRIOS***

VILA VELHA – ES

2006

MARIZE LYRA SILVA PASSOS

***TÉCNICA PARA SELEÇÃO DE POÇOS CANDIDATOS À PERFURAÇÃO
UNDERBALANCED: BASEADA EM UM MÉTODO DE AUXÍLIO À DECISÃO POR
MÚLTIPLOS CRITÉRIOS***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Petróleo do Centro Universitário Vila Velha, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Aguiar Almeida - Phd

VILA VELHA – ES

2006

Catálogo na publicação elaborada pela Biblioteca Central / UVV-ES

P289t Passos, Marize Lyra Silva.

Técnica para seleção de poços candidatos à perfuração
underbalanced / Marize Lyra Silva Passos – 2006.

114 f., il.

Orientador: Maurício de Aguiar Almeida.

Monografia (graduação em Engenharia do Petróleo) –
Centro Universitário Vila Velha, 2006.

Inclui bibliografias.

1. Engenharia do petróleo. I. Almeida, Maurício de
Aguiar. II. Centro Universitário Vila Velha. III. Título.

CDD 665.5

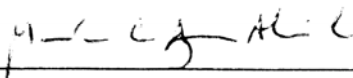
MARIZE LYRA SILVA PASSOS

***TÉCNICA PARA SELEÇÃO DE POÇOS CANDIDATOS À PERFURAÇÃO
UNDERBALANCED: BASEADA EM UM MÉTODO DE AUXÍLIO À DECISÃO POR
MÚLTIPLOS CRITÉRIOS***

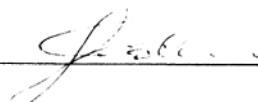
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Petróleo do Centro
Universitário Vila Velha, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Petróleo.

Aprovado em 16 de setembro de 2006

Comissão examinadora:



Prof. Dr. Maurício de Aguiar Almeida - Phd (Orientador)
Centro Universitario Vila Velha



Prof. M.Sc. João Carlos Loss
Centro Universitario Vila Velha



Prof. M.Sc. Deusélio Bassini Fioresi
Centro Universitario Vila Velha

VILA VELHA – ES

2006

DEDICATÓRIA

Ao meu marido, Toninho Passos, que me serviu de modelo, me apoiou, incentivou e me acompanhou, nessa caminhada, de forma incondicional, apesar de suas várias ocupações.

Ao meu filho, Thiago, pelos momentos que, novamente, deixei de estar ao seu lado.

A minha mãe, Maria Dulce, e minha avó, Dulce, mulheres fortes e guerreiras, que se orgulham de mim e me apoiaram em mais este sonho.

AGRADECIMENTOS

Ao final de mais esta etapa de minha vida estudantil, profissional e pessoal gostaria de agradecer o apoio que recebi de todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram com este trabalho.

Aos meus familiares, em especial, aos meus pais Zelio e Maria Dulce, às minhas irmãs Penha e Fátima, aos meus sobrinhos Rodrigo e Rafael e a tia Maria.

A amiga Isaura, professora do CEFETES que, entendendo a minha vontade de obter mais conhecimentos, me apoiou e facilitou a minha dupla jornada de aluna e professora do CEFETES.

Aos professores do curso de Engenharia de Petróleo da UVV que, com muita dedicação e esforço, conseguiram transmitir seus conhecimentos e experiências pessoais que em muito ajudaram na minha formação. Em particular, ao professor Deusélio que me ajudou a entender as bases estatísticas do método usado neste trabalho.

Ao Engenheiro Lage, da Petrobras, por lançar a semente inicial do tema abordado neste trabalho e por disponibilizar material de pesquisa.

Aos meus colegas de faculdade que se foram comigo e os que ficaram pelo caminho, por todos os bons e maus momentos que vivemos juntos nestes cinco anos.

A Andréia, secretaria do curso de engenharia de petróleo da UVV, que nestes cinco anos esteve sempre resolvendo todos os nossos problemas prontamente com muita paciência e atenção.

Em especial ao meu orientador e amigo Mauricio que, apesar de toda a distância me apoiou, orientou e transmitiu seus vastos conhecimentos para o sucesso deste trabalho.

Agradeço também a todas as pessoas que me incentivaram a continuar caminhando.

“Viver hoje é um desafio. Um desafio que temos que aceitar, e mais do que aceitar, saborear, enfrentar e vencer. Não se deixe dominar pela nostalgia, pelo pessimismo, pela apatia.”

“Aceite a mudança, viva a mudança, MUDE! Estar vivo, no mundo de hoje é um privilégio. É a era mais rica da história da humanidade!”

Do livro Socorro! Preciso de Motivação de Luiz A. Martins Filho

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de criação de ferramenta de apoio à tomada de decisão, para seleção, por especialistas de poços candidatos à utilização da Tecnologia de Perfuração *Underbalanced* (UBD), aplicada a poços de petróleo.

Essa ferramenta é baseada no método de Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios (MCDA - *Multiple Criteria Decision Aid*) e no método de Análise Hierárquica do Processo (AHP - *Analytic Hierarchy Process*). Este último, para a ponderação e classificação da relevância dos vários critérios, interdependentes, que devem ser adotados no processo de avaliação dos poços. No presente trabalho, esses critérios são levantados a partir do conhecimento das razões técnicas que justificam a utilização ou não da tecnologia UBD.

Toda a metodologia proposta é descrita ao longo do trabalho e ao final é apresentada uma aplicação prática.

Palavras Chaves: Engenharia de Petróleo, Engenharia de Poço, Perfuração *Underbalanced*, Técnica de Seleção, MCDA e AHP.

ABSTRACT

This work presents a proposal of a tool's creating which agile and easy, to support the technique for previous selection, for specialists, candidates wells to use of the Underbalanced Drilling (UBD).Technology.

This tool will be based on a method called Multiple Criteria Decision Aid (MCDA), the method called *Analytic Hierarchy Process* (AHP) for the balance and classification of some criteria is relevance, which is interdependent, that must be considered in the process of previous evaluation of wells. These criteria will be contained from the reasons` knowledge of the reasons, in literature, for the use or not of the Underbalanced Drilling technology.

All the methodology proposal is described throughout the work and to the end a practical application is presented.

Keys Words: Petroleum Engineering, Well Engineering, Underbalanced Drilling, Technique for Selection, MCDA and AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Técnicas de perfuração UB e OB.	1
Figura 2 - Gráfico das atividades underbalanced – 1994 - 2005.....	8
Figura 3 – Esquema de prisão de coluna por diferencia de pressão.....	12
Figura 4 – Esquema de uma prisão diferencial.	20
Figura 5 – Representação do dano à formação.	29
Figura 6 - Dano à formação.	31
Figura 7 - Gráfico do efeito <i>Skin</i> na taxa de produção.	32
Figura 8 - Redução da garganta do poro.....	33
Figura 9 - Danos causados por filtrado do reboco e sólidos da lama.....	34
Figura 10 - Tipos de ruptura ao redor de poços (Fjær et al., 1992)	42
Figura 11 - Típicas ocorrências de instabilidade de poços durante a perfuração	43
Figura 12 - Gráfico da relação entre saturação e pressão capilar.	48
Figura 13 - Gráfico da Pressão de circulação equivalente e da pressão de reservatório x Profundidade.....	50
Figura 14 – Cone de água em um reservatório de óleo com aquífero.	53
Figura 15 - Cone de gás em um reservatório de óleo com capa de gás.....	53
Figura 16 – Migração de finos na formação.....	54
Figura 17 - Finos na formação.	54
Figura 18 - Estrutura hierárquica do AHP.....	63

Figura 19 - Escala de comparação de critérios.	64
Figura 20 - Escala de comparação de critérios.	64
Figura 21 - Estrutura hierárquica da análise de poço candidato.	72
Figura 22 – Subcritérios do critério C1 – Informações Operacionais.....	72
Figura 23 - Subcritérios do critério C2 – Dano à Formação	72
Figura 24 - Subcritérios do critério C3 – Problemas de Perfuração Convencional.....	73
Figura 25 - Subcritérios do critério C4 – Problemas de Perfuração UB	73
Figura 26 - Gráfico de Importância dos critérios na seleção dos poços.....	76
Figura 27 - Quadro comparativo para recomendações.....	81
Figura 28 - Planilha para seleção de poço candidatos a UBD.....	82
Figura 29 – Preenchimento da planilha de avaliação de poço – exemplo 1.....	83
Figura 30 - Preenchimento da planilha de avaliação de poço – exemplo 2.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Previsão de perfuração de poços UB.....	7
Tabela 2 - Indicadores pra seleção de poços candidatos.....	18
Tabela 3 - Indicadores de poços não candidatos.....	39
Tabela 4 – Quantidade de artigos técnicos utilizando métodos MCDA em pesquisas de Eng. de Produção.	59
Tabela 5 – Matriz de julgamento de critérios.	65
Tabela 6 - Índice de aleatoriedade.	66
Tabela 7 - Desempenho das alternativas com relação ao critério C1.	67
Tabela 8 - Desempenho das alternativas com relação ao critério C2.	67
Tabela 9 - Desempenho das alternativas com relação ao critério C3.	68
Tabela 10 - Matriz de decisão	68
Tabela 11 – Tabela de desempenho global das alternativas	69
Tabela 12 – Matriz de relevância dos critérios	74
Tabela 13 - Relevância das alternativas para o critério C1.	74
Tabela 14 - Relevância das alternativas para o critério C2.	75
Tabela 15 - Relevância das alternativas para o critério C3.	75
Tabela 16 - Relevância das alternativas para o critério C4.	76
Tabela 17 – Importância dos Critérios na seleção de poços.....	76
Tabela 18 - Matriz de relevância do subcritério C1.....	77

Tabela 19 - Matriz de relevância do subcritério C2.....	77
Tabela 20 - Matriz de relevância do subcritério C3.....	78
Tabela 21 - Matriz de relevância do subcritério C4.....	78
Tabela 22 - Grau de importância na avaliação do critério C1.	79
Tabela 23 - Grau de importância na avaliação do critério C2.	79
Tabela 24 - Grau de importância na avaliação do critério C3.	79
Tabela 25 - Grau de importância na avaliação dos critérios.	80
Tabela 26 – Pontuação Informações Operacionais	92
Tabela 27 - Pontuação Dano à Formação.....	93
Tabela 28 – Pontuação Problemas de perfuração OB.....	95
Tabela 29 – Pontuação Problemas de perfuração UB	97

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Força mínima necessária para liberar a coluna.	21
Equação 2 - Trabalho realizado pela broca.	24
Equação 3 - Volume de rocha perfurada.	24
Equação 4 - Energia mecânica específica.	25
Equação 5 – Fator <i>Skin</i>	29
Equação 6 - Lei de Darcy	30
Equação 7 – Lei de Darcy modificada.....	31
Equação 8 - Autovetor da matriz de critérios.	65
Equação 9 – Cálculo de λ	65
Equação 10 - Equação para cálculo de razão de coerência.	66
Equação 11 – Calculo de CR para a tabela 5.....	67

LISTA DE SIGLAS

AHP - Analytic Hierarchy Process

BHA – *Bottom Hole Assembly*.

BHP – Pressão do Fundo do Poço.

BOP - *Blowout Preventer*.

BOPD – Barril de Óleo por Dia.

ECD - *Equivalent Circulating Density* (Densidade Circulação Equivalente).

ELECTRE - Elimination et Choix Traduisant la Réalité

H₂S – Gás Sulfídrico.

KCl – Cloreto de Potásio.

MASP – *Maximum Allowable Surface Pressure* (Máxima Pressão de Superfície Permitida).

MCD – *Mud Cap Drilling*

MACBETH Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique

MCD A - *Multiple Criteria Decision Aid*

MWD - *Measurement While Drilling*

PH - Potencial Hidrogeniônico.

PSID - *Pounds per Square Inch Differential*.

RAO – Razão Óleo Água.

RBOP – *Rotating Blowout Preventer*.

ROP – Taxa de Penetração.

UB – *Underbalanced*.

UBD – Perfuração *Underbalanced*.

VPL – Valor Presente Líquido.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	HISTÓRICO DAS OPERAÇÕES <i>UNDERBALANCED</i>	4
3	MOTIVOS PARA A UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA UBD	9
4	CRITÉRIOS DE ESCOLHA DE POÇOS CANDIDATOS	17
4.1	RAZÕES PARA UTILIZAR A UBD	17
4.1.1	<i>Prisão de Coluna</i>	<i>19</i>
4.1.2	<i>Perda de Circulação</i>	<i>22</i>
4.1.3	<i>Formação com Rochas Duras</i>	<i>22</i>
4.1.4	<i>Redução / Eliminação de Programas de Fluidos Caros</i>	<i>26</i>
4.1.5	<i>Segurança e Meio Ambiente.....</i>	<i>26</i>
4.1.6	<i>Dano à Formação</i>	<i>27</i>
4.1.7	<i>Avaliação da Formação</i>	<i>37</i>
4.2	RAZÕES PARA NÃO UTILIZAR UBD	37
4.2.1	<i>Reservatório com Baixa Qualidade</i>	<i>39</i>
4.2.2	<i>Alta Pressão de Poros e Alta Permeabilidade da Formação</i>	<i>40</i>
4.2.3	<i>Poços Rasos.....</i>	<i>40</i>
4.2.4	<i>Estabilidade do Poço</i>	<i>41</i>
4.2.5	<i>Argilas Expansivas</i>	<i>46</i>
4.2.6	<i>Dano por Embebição Espontânea</i>	<i>47</i>
4.2.7	<i>Movimentação Freqüente</i>	<i>49</i>
4.2.8	<i>Longos Intervalos</i>	<i>49</i>
4.2.9	<i>Pouco Conhecimento da Formação</i>	<i>51</i>

4.2.10	<i>Variação da Pressão da Formação</i>	51
4.2.11	<i>Alto Índice de H₂S</i>	51
4.2.12	<i>Dano por Formação de Cone</i>	52
4.2.13	<i>Dano por Migração de Finos</i>	53
4.2.14	<i>Vitrificação</i>	54
5	TOMADA DE DECISÃO	56
5.1	MÉTODO AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS)	62
5.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP	62
5.2.1	<i>Passo 1 - Estruturação</i>	62
5.2.2	<i>Passo 2 - Atribuição de Pesos para Critérios e Alternativas</i>	63
5.2.3	<i>Passo 3 - Síntese dos Resultados</i>	68
6	MODELO PROPOSTO PARA A TÉCNICA DE SELEÇÃO DE POÇOS	70
6.1	APLICANDO A TÉCNICA AHP	71
6.2	CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA	80
6.3	EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA	83
7	CONCLUSÃO	85
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS AUXILIARES	91
	ANEXO 1 – REFERÊNCIA PARA PONTUAÇÃO DOS CRITÉRIOS	92

1 INTRODUÇÃO

A técnica de perfuração convencional, também conhecida como *overbalanced* (OBD), tem sido usada como a principal técnica de perfuração de poços de petróleo. Ela consiste em perfurar o poço mantendo o gradiente de pressão do fluido de perfuração maior que o gradiente de pressão das formações perfuradas, evitando assim que os fluidos da formação fluam para o poço. Ela apresenta alguns problemas, entre eles, podem-se citar os danos à formação, na vizinhança das paredes do poço, que causam uma queda na produção e problemas mecânicos durante a perfuração. Esses problemas são causados, na maioria das vezes, pela invasão de fluidos incompatíveis com a formação, a presença de reboco e de cimento e a expansão de argilas. (BLADE, 2005; LIMA, 2006)

Atualmente, outra maneira de se perfurar poços é utilizando a tecnologia de Perfuração *Underbalanced* (UBD). Essa técnica é definida como a prática de perfurar poços com o gradiente de pressão do fluido de perfuração menor que o gradiente de pressão da formação, e difere-se da perfuração convencional por possuir pressão de circulação no fundo do poço mais baixa que a pressão da formação, permitindo assim que o poço flua enquanto é perfurado. (BENNION, 199-)

A figura 1 apresenta esquema comparativo entre a perfuração *overbalanced* e a perfuração *underbalanced*, ressaltando as principais diferenças entre os métodos, como a formação de reboco e a diferença de pressão entre a formação e o fluido de perfuração.

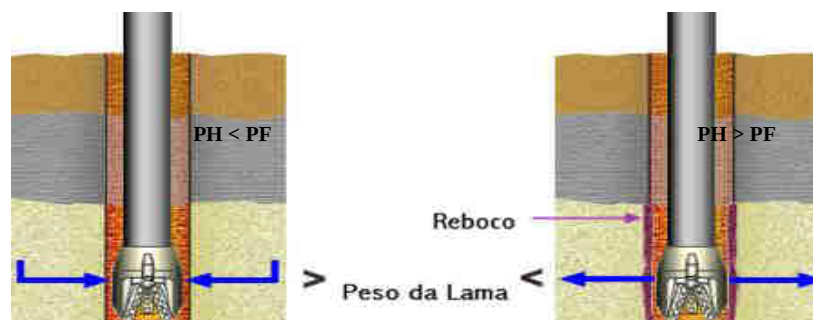


Figura 1 – Técnicas de perfuração UB e OB.

Quando a UBD é utilizada, em geral obtêm-se bons resultados. Entre eles, pode-se citar a descoberta de zonas de produção de difícil reconhecimento, aumento da taxa de perfuração (ROP), eliminação do problema de perda de circulação, antecipação da produção e redução dos danos à formação, obtendo como resultado final o aumento da recuperação dos hidrocarbonetos e conseqüente melhora do VPL (Valor Presente Líquido) do projeto. (AL-AJMI, 2003)

Contudo a UBD não é uma solução para todos os problemas de perfuração e nem se aplica a todos os tipos de reservatórios. Faz-se necessária então, uma boa análise dos dados referentes ao poço candidato à utilização da tecnologia UBD, visando garantir uma escolha correta. Por outro lado, se ela for usada de forma inadequada, pode gerar mais problemas do que a perfuração convencional (OBD). Por esse motivo, para auxiliar no processo de tomada de decisão, é importante aplicar um critério fácil e confiável para a identificação dos poços candidatos à utilização da tecnologia UBD. (KIMERY, 2004).

Nenhuma decisão é fácil de ser tomada, ainda mais se esta decisão envolve vários critérios interdependentes e enormes quantias em dinheiro, como no caso da utilização da tecnologia UBD. Para facilitar esta tomada de decisão deve-se tomar por base a utilização da teoria da decisão que é formada por um conjunto de procedimentos e métodos de análise que procuram assegurar a coerência, a eficácia e a eficiência das decisões tomadas em função das informações disponíveis, antevendo cenários possíveis. (GOMES, 2002). Para isso utilizam-se ferramentas específicas de apoio como, por exemplo, os métodos de Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios ou do inglês, Multiple Criteria Decision Aid (MCDA).

O presente trabalho propõe a criação de uma ferramenta, para apoio à técnica de seleção de poços, na avaliação prévia de candidatos à utilização da UBD. Ela será baseada em um método de MCDA e no método de Análise Hierárquica de Processos (Analytic Hierarchy Process - AHP), que darão suporte a recomendação sobre utilização ou não da UBD.

No capítulo 2 do trabalho, é feita uma apresentação da evolução histórica das operações de perfuração *underbalanced*, o crescimento no mundo e as novas fronteiras dessa tecnologia. No capítulo seguinte (capítulo 3), são apresentadas as principais vantagens e desvantagens da utilização da tecnologia de perfuração *underbalanced*.

No capítulo 4, são apresentados os fatores, referenciados na literatura, que devem ser considerados para integrar o conjunto de critérios de verificação do processo de seleção de poços candidatos. Esses fatores são importantes indicadores para abonar ou desabonar a utilização da tecnologia de perfuração *underbalanced*.

O capítulo 5 trata da apresentação de duas ferramentas gerenciais, já conhecidas na literatura, que servem para auxiliar o processo de tomada de decisão. É descrita a utilização do Método de Auxílio a Decisão por Múltiplos Critérios (MCDA) e do Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Logo em seguida, no capítulo 6, apresenta-se a aplicação do método AHP para subsidiar o julgamento e verificação de coerência, na ponderação e classificação dos critérios, que serão utilizados na ferramenta de apoio à técnica proposta para seleção de poços candidatos.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões e recomendações para pesquisas futuras e o aprimoramento da técnica proposta.

2 HISTÓRICO DAS OPERAÇÕES *UNDERBALANCED*

A técnica de perfuração *underbalanced* (UBD) vem sendo utilizada desde os primeiros poços de petróleo, na Pensilvânia, no início do século XIX. Os primeiros poços foram perfurados com ferramentas a cabo, e somente os fluidos da formação enchiam o poço. A falta de um fluido pesado no poço gerava, constantemente, *blowouts* (descontrole do poço). Em princípio, esses *blowouts*, freqüentes, eram tolerados como um efeito secundário e inevitável. Com o emprego da tecnologia de perfuração rotativa e a utilização de fluido de perfuração pesado, houve uma redução do risco de ocorrência dos *blowouts*. (LIMA, 2006).

A primeira patente de operação de perfuração *underbalanced* foi registrada em 1866; ela utilizava ar comprimido para a retirada dos cascalhos, gerados durante a perfuração, do fundo do poço. Com a evolução da indústria do petróleo, no início do século XX, os técnicos começaram a estudar e utilizar fluidos mistos e multifásicos, com o objetivo de controlar a ocorrência de *kicks* (influxo de fluidos da formação para o poço), e *blowouts*. Foram desenvolvidos algoritmos e equações, para predizerem a quantidade de gás e a pressão dinâmica necessária aos fluidos, para que esses pudessem limpar o fundo do poço. No início dos anos 30, foi realizada a primeira perfuração utilizando fluido multifásico. (AL-AJMI, 2003)

O uso de fluido multifásico, para a produção de poços, ar ou gás com água ou óleo, tornou-se popular no sul dos Estados Unidos nos anos 30. Inicialmente, foi introduzida a utilização da névoa e houve, também, um aumento da utilização de ar e gás natural. Foram introduzidos sistemas fechados para a captura dos fluidos produzidos, aumentando, com isso, a segurança dos sistemas. (BLADE, 2005)

A utilização de espuma tornou-se popular nos anos 60, devido a sua melhor capacidade de realizar a limpeza do poço, quando comparada com a utilização de ar e fluido multifásico. (AL-AJMI, 2003)

Durante os anos 70, a utilização da UBD era limitada devido aos fatores complicadores inerentes a sua utilização, tais como, emprego de maior quantidade de equipamentos e de mão-de-obra na locação e necessidade de aumento da segurança e do controle ambiental, dentre outros, que impediam o seu crescimento; esses fatores eram parcialmente compensados pelo aumento da taxa de penetração. Os problemas ambientais eram os principais obstáculos causados pela perfuração com gás que liberava grande quantidade de pó na atmosfera, e nos sistemas com espuma a preocupação era com o desperdício gerado. Durante os anos 80, a técnica de UBD foi usada em reservatórios e seções de poços que estavam depletados. A utilização dessa tecnologia tinha como principal objetivo o aumento da taxa de penetração (ROP) em horizontes não produtivos (LIMA, 2006).

O ressurgimento das operações *underbalanced*, ocorreu no final dos anos 80 e início dos anos 90, principalmente devido à melhoria na capacidade de modelagem de fluidos multifásicos e o desenvolvimento de novas tecnologias, tais como:

- sistema de reciclagem de espuma;
- separador de quatro fases;
- sistemas de MWD eletromagnéticos;
- sistema de geração de nitrogênio. (BLADE, 2005)

No final dos anos 80, a eliminação dos principais problemas tecnológicos associados à UBD e a introdução da perfuração horizontal, provocaram um rápido crescimento no número de poços perfurados com essa tecnologia no mundo. Ela provou ser eficiente na minimização de danos típicos causados à formação; isso incentivou as companhias a não mais considerarem somente o método *overbalanced* como primeira opção para a perfuração de poços. Como consequência disso, a UBD passou a ser utilizada, principalmente na perfuração de poços horizontais cujo objetivo era de interceptar o maior número possível de estruturas verticais. (BLADE, 2005)

A tecnologia UBD deixou de ser utilizada somente no sul dos EUA e Canadá, passando a ser utilizada também na América do Sul, Oriente Médio, e sudeste da Ásia, África, Austrália e Europa.

No início da década de 90, a UBD, passou a ser utilizada em perfuração *offshore* nos EUA. Apesar dos vários anos e milhares de poços já terem sido perfurados *offshore*, a sua implantação em unidades flutuantes ainda é um grande desafio.. A literatura relata algumas utilizações de UBD a partir de plataformas fixas ou *jackup*, mas as dificuldades operacionais associadas com a segurança, logística e necessidades de equipamentos especiais, limitam o seu uso em plataformas flutuantes. (LAGE, *et al*, 2005)

Até o final do ano de 2000, a Petrobras em conjunto com outras operadoras, havia realizado uma perfuração de poço *offshore* a partir da plataforma semi-submersível Petrobras 17, no campo de Albacora, em uma lâmina d'água de 974 ft, utilizando lama aerada. Embora não tenha sido uma perfuração *underbalanced*, a técnica de retorno do fluido de perfuração à superfície foi realizada como num caso típico de sistema UBD. (LAGE, *et al*, 2005)

A partir desse marco, a Petrobras começou a desenvolver uma tecnologia de perfuração com a utilização de gradiente dual (DGD). Em águas profundas, essa tecnologia atende aos desafios associados ao gerenciamento de formações, que apresentam uma pequena diferença de pressão entre a pressão de poros e a de fratura da formação (janela operacional estreita). Esse foi um primeiro ensaio para a utilização de UBD a partir de plataformas flutuantes. (LAGE, *et al*, 2005)

Segundo LAGE, *et al*, 2005, em 2003, na Bacia de Santos, um poço exploratório vertical atingiu um reservatório carbonático fraturado, apresentando, então, problemas de perda de circulação de difícil solução utilizando a técnica de perfuração convencional, esse poço foi, então, abandonado. Um segundo poço exploratório planejado no bloco considerou a possibilidade da utilização da UBD, como uma alternativa atrativa para solucionar os problemas enfrentados na perfuração do primeiro poço. No segundo quadrimestre de 2005, outro poço foi

planejado para ser perfurado, desta vez, utilizando a tecnologia UBD. Essa foi à primeira operação UBD realizada a partir de um navio-sonda equipado com Sistema DP (*Dynamic Positioning System*).

A implantação da tecnologia UBD, em águas profundas, criou novos desafios associados à necessidade de utilização de novos equipamentos, modificação no *riser* e modificação e criação de novos procedimentos. (LAGE, *et al*, 2005)

A seguir, apresentamos a tabela 1 que representa o número de poços *underbalanced* que deveriam ser perfurados até o ano de 2005, conforme previsão feita por Duda & Medley's, em 1996. A tabela mostra que já havia indicação para o mercado de crescimento considerável da utilização de perfuração UBD, desde 1996.

Ano	M\$US-UBD	M – UBD		
		Poços	UBD	%
1994	1.904,92	21.566	1.663	8%
1995	2.450,93	21.056	2.309	11%
1996	3.001,84	22.898	2.921	13%
1997	3.895,54	27.465	4.331	16%
1998	4.958,18	24.083	4.060	17%
1999	5.846,97	17.859	3.481	19%
2000	6.740,67	19.368	4.035	21%
2001	7.800,86	20.175	4.778	24%
2002	8.865,95	21.018	5.558	26%
2003	9.933,48	22.108	6.437	29%
2004	11.165,07	23.256	7.006	30%
2005	12.225,26	24.464	7.477	31%

Tabela 1 - Previsão de perfuração de poços UB.

O gráfico da figura 2 é representativo das atividades de perfuração *underbalanced* ocorridas nos Estados Unidos entre os anos de 1994 e 2005, confirmando as previsões feitas por Duda & Medley's sobre a tendência do mercado mundial.

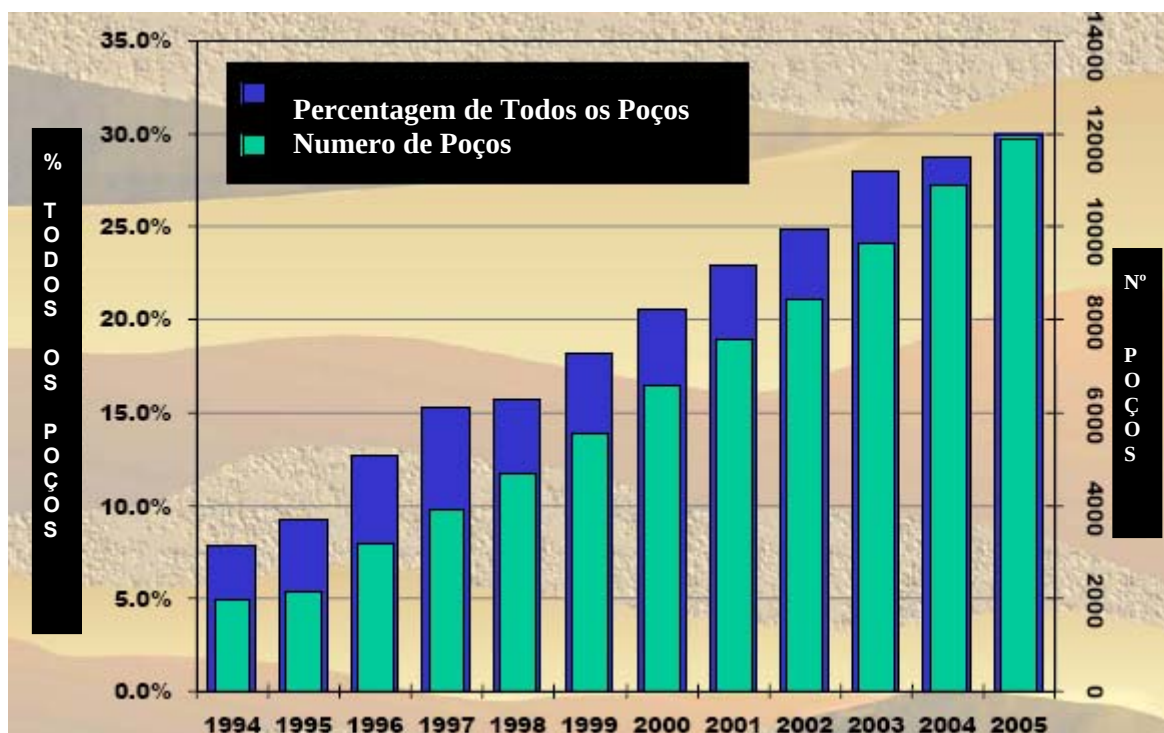


Figura 2 - Gráfico das atividades underbalanced – 1994 - 2005

A utilização da tecnologia UBD tem sofrido grandes mudanças; no passado foi utilizada para resolver problemas de perfuração ou para aumentar a taxa de penetração; atualmente, ela está sendo impulsionada pelo desejo de melhoria da produtividade, uma vez que esse ganho gera um aumento no resultado financeiro final do poço, obtendo um melhor Valor Presente Líquido (VPL) do projeto. (BLADE, 2005)

A cada ano, o número de poços perfurados com a utilização da UBD vem aumentando. Isso se deve ao fato de que está se consolidando a percepção das companhias operadoras, das vantagens de aplicação desta tecnologia.

3 MOTIVOS PARA A UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA UBD

As operações *underbalanced* oferecem vários benefícios à perfuração de poços, entre estes podemos citar: redução do dano à formação, aumento da produtividade, com conseqüente, redução da necessidade de estimulação da formação; melhora a qualidade da avaliação da formação da identificação de fraturas; minimização da perda de circulação; redução da probabilidade de prisão da coluna de perfuração; aumento da taxa de penetração; aumento da vida útil da broca; redução e/ou eliminação de programas de fluidos onerosos; melhora na segurança e redução dos impactos ambientais; antecipação da produção. (BLADE, 2005)

O aumento da produtividade do reservatório, talvez seja a vantagem mais importante da UBD. A perfuração convencional, utilizando lama pesada, gera *overbalanced* entre o poço e a formação, que pode resultar na invasão da formação de interesse por contaminantes provenientes dos fluidos de perfuração. Conseqüentemente, este *overbalance*, pode causar um dano significativo ao reservatório na região ao redor do poço, reduzindo a sua produtividade, e requerendo um tratamento extra para a remoção do dano. Esses problemas serão evitados, se o poço for perfurado em *underbalance*. Caso não ocorram danos à formação causados pelos fluidos de perfuração, a probabilidade da necessidade de operações extras de estimulação da formação será bastante reduzida. (AL-AJMI, 2003)

Para minimizar o dano à formação, serão requeridas técnicas de estimulação caras, como a acidificação¹ e o fraturamento². A geração de dano à

¹ É o processo que consiste em se injetar um ácido a uma pressão inferior à pressão de fraturamento, objetivando remover danos da formação. Esse ácido é posteriormente recuperado da formação para evitar danos.

² É o processo no qual um fluido é injetado no reservatório, criando uma pressão superior a sua pressão de fraturamento (quebra da formação), gerando fratura na rocha-reservatório que se propaga através da formação e cria um caminho preferencial de elevada condutividade para o fluxo do fluido do reservatório.

formação, é uma preocupação durante a perfuração de poços com alta inclinação e poços horizontais, onde os reservatórios são expostos por um considerável período de tempo, a um *overbalance* provocado pelos fluidos e sólidos. Empregando a técnica de UBD, a invasão da formação por fluidos e sólidos pode ser minimizada, ou, em muitos casos, eliminada, reduzindo, assim, o dano à formação e maximizando a produtividade do poço. (BLADE, 2005)

Entretanto, a profundidade de penetração do fluido pode ser maior se ocorrer a condição de *overbalance* acidental durante a UBD. Nesse caso, se a formação for sensível a danos causados pela fase líquida, o dano será ainda maior que aquele causado pela perfuração convencional, pois nesse caso não existe a formação do reboco para proteger o poço. Então, é imperativo um planejamento cuidadoso ao se perfurar em *underbalance*. É imprescindível a verificação do modelo de pressão no fundo do poço e a compatibilidade dos fluidos, antes da operação de perfuração, para prevenir a ocorrência de obstáculos à produção. Se o modelo não é verificado, há uma grande possibilidade de ocorrer condições *overbalanced* no reservatório que irá gerar mais problemas do que benefícios. (BLADE, 2005)

Outra vantagem significativa da UBD, é que ela permite uma avaliação contínua da formação. Podemos destacar a obtenção de características de produção, como tipos de fluidos, taxas de fluxo e pressões e parâmetros de reservatório, como pressões estáticas, podem ser estimados durante a perfuração. (BLADE, 2005)

Fraturas na formação, comportamento dos fluidos e pressões podem ser identificados durante a UBD. A condição de *underbalance* propicia o fluxo dos fluidos da formação para o poço, causado por um diferencial de pressão negativo. Isso permite também a detecção de áreas de interesse que poderiam ser mascaradas em uma condição de *overbalance*. A presença de uma formação produtora é detectada pelo aumento marcante da taxa de fluxo no poço. (BLADE, 2005)

Quando fluidos de perfuração convencionais são utilizados, existem vários fatores que precisam ser considerados para assegurar uma avaliação correta da

geologia de sub-superfície, tais como: salinidade da lama; profundidade da invasão do filtrado; pressão induzida de fratura causada pelo fluido; composição química básica do fluido do sistema. (AL-AJMI, 2003)

A rocha perfurada está sujeita ao mecanismo de agitação do fluido durante a sua retirada do poço. Essa ação em confronto com os efeitos químicos do fluido de perfuração resulta na deteriorização da amostra. Devido à condição *overbalance*, o influxo da formação é evitado, com isso, possíveis zonas produtoras poderão ser negligenciadas. (AL-AJMI, 2003)

As aberturas geradas, pelo fraturamento na formação, são aproximadamente três vezes maiores que a maior partícula do fluido. Devido à natureza dos fluidos de perfuração convencionais, a perda de circulação é um risco constante. Mantendo-se as condições de *underbalance* não haverá perda de circulação, porém, em casos especiais, como influxo de água, haverá formação de anéis de lama que irão tamponar a formação. (AL-AJMI, 2003)

A perda de circulação é definida como a perda de lama para a formação; isso ocorre quando a pressão hidrostática da lama é maior que a pressão de fratura da formação. (THOMAS, 2001) Em reservatórios muito depletados, com alta permeabilidade, a perda total no retorno é uma séria preocupação quando é utilizado sistema *overbalance*, pois nesse caso, a capacidade de remoção dos cascalhos será perdida e haverá um acúmulo de sólidos que resultará no travamento mecânico da coluna. Por essa razão, vários campos depletados ou reservatórios, com baixa pressão, não podem ser perfurados com fluidos de perfuração convencionais. (AL-AJMI, 2003)

Quando a coluna de perfuração é centralizada no poço, a pressão hidrostática exercida na coluna é igual em todas as direções. Porém quando a coluna consegue entrar em contato com o reboco a coluna pode ficar presa nele contra a parede do poço. Para toda a área em contato com o reboco, existe uma força F_o determinada pelo produto da área A_1 pela pressão de poros da formação P_o , essa é menor que a força F_h exercida na área A_2 , essa força é determinada pelo

produto da área A_2 pela pressão hidrostática do poço P_h . A diferença F existente entre essas duas forças é que segura a coluna no local. Esse mecanismo é conhecido como mecanismos de prisão por diferencial e pode ser verificado no esquema da figura 3.

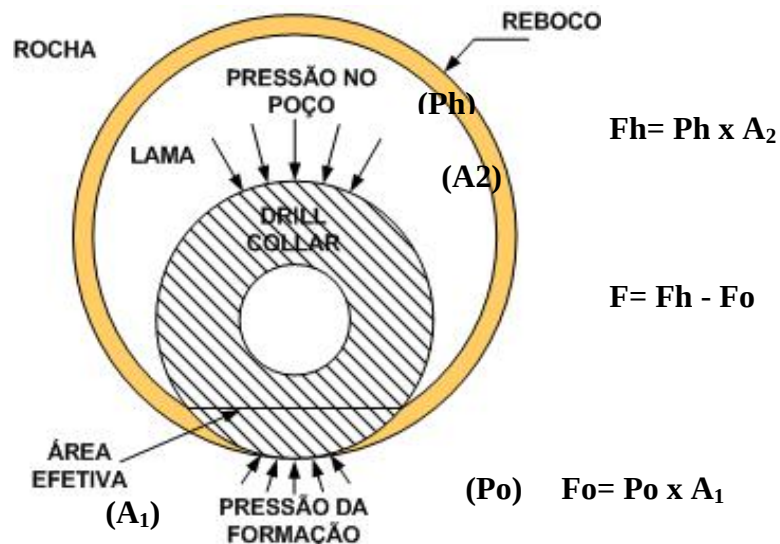


Figura 3 – Esquema de prisão de coluna por diferencia de pressão

Em operações de perfuração convencional, todos os ingredientes necessários estão sempre presentes, e o diferencial de pressão é uma preocupação constante. Com a utilização da UBD não existe o diferencial de pressão hidrostática na formação e nem o reboco. Então é impossível de ocorrer a prisão de coluna quando perfuramos *underbalanced*. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Quando utilizamos a perfuração convencional, em um estado de *overbalance*, a pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração cria uma força sobre a rocha que está sendo perfurada, isso requer mais energia para a remoção da rocha perfurada ao mesmo tempo em que o reboco é depositado, nesse caso ocorre uma perda inicial do fluido de perfuração até que o reboco seja formado. Os cortadores da broca precisam remover esse depósito na formação para iniciar a penetração, o tipo de sólido perfurado e o conteúdo total de sólidos irão impactar a taxa de penetração da broca. As maiores culpadas desse impacto são as micro-partículas e não as grandes partículas. Na perfuração convencional, quando os

cascalhos não são removidos pelo sistema de controle de sólidos, então, eles são re-circulados e re-introduzidos no poço e submetidos à remoagem. A redução do tamanho dos constituintes do fluido, em partículas coloidais, reduz a taxa de penetração. (BLADE, 2005)

Na UBD, não existe uma pressão atuando sobre a rocha que segure os sólidos no local. Considerando que o fluido da UBD é livre de sólidos, esses não serão re-introduzidos no sistema de circulação para serem remoídos. Além disso, desde que a pressão da formação seja maior que a pressão do poço, menos energia é gasta com a quebra da rocha, e altas taxas de penetração são alcançadas. Taxas de penetração até dez vezes maiores que as alcançadas na perfuração convencional não são incomuns de ocorrerem quando perfuramos em *underbalance*. (BLADE, 2005)

Uma considerável quantidade de calor é gerada pelo atrito da broca e pelo atrito da coluna com o poço, o fluido de perfuração transporta esse calor por convecção. Deve-se notar que os sólidos no fluido de perfuração contribuem para adicionar calor ao atrito gerado na broca, quanto maior o volume de sólidos inertes, maior calor será gerado. O transporte do calor para longe da broca é mais eficiente na perfuração UB. Como não existe uma força adicional pressionando a formação, a broca realiza menos trabalho para cortar a formação e afastar os cascalhos para longe da sua face cortante. (SCHUBERT, 2006)

Usando a perfuração UB, a fração de sólidos retida é mínima, e mantida em um valor mínimo, dependendo se é utilizado um processo de mão única ou um sistema de *loop* fechado. A UBD, também requer menos peso sobre a broca para obter uma boa taxa de perfuração. Essa exigência reduz a carga nos cortadores e rolamentos aumentando a vida útil da broca. (SCHUBERT, 2006)

Fluidos de perfuração convencional são compostos por muitos produtos químicos que são adicionados para controlar suas propriedades físicas e químicas, tais como a viscosidade, o filtrado, o pH, o peso específico, etc. No caso de perda em zonas de retorno de fluido, produtos químicos e partículas maiores são

adicionados ao fluido para tentar controlar essa perda. Entretanto, muitas vezes esse sistema pode ser muito caro. Normalmente em UBD é usado um fluido simples (como água salgada ou o próprio óleo produzido pelo poço), com isto podem ser eliminados programas de fluidos caros na seção perfurada em *underbalance*. (BLADE, 2005; AL-AJMI, 2003)

A perda de lama é o maior custo operacional contabilizado nas operações de perfuração pelo mundo. A experiência de campo possibilita uma boa orientação a respeito do tipo de severidade da perda que pode ser esperada durante a operação (DEVEREUX, 1988). Portanto, economias significativas podem ser realizadas evitando-se a perda de fluidos caros para a formação.

O planejamento do poço deverá prever as possíveis perdas e estar pronto para reagir da melhor maneira possível se elas ocorrerem. Algumas perdas não podem ser evitadas. Nesse caso, a escolha é continuar a perfuração; usar fluido de perfuração mais leve ou com ar, tal como espuma; evitar a zona de perda, que poderá necessitar de técnicas especiais de cimentação; ou, por último, abandonar o poço. (DEVEREUX, 1988)

A técnica UBD por utilizar fluidos leves, como ar, gás, espuma e névoa, é uma boa indicação para resolver ou minimizar o problema de perda de circulação evitando que poços ainda produtivos sejam abandonados. (HALLIBURTON, 2006)

Durante a perfuração convencional, o projeto do poço é realizado para evitar que os fluidos do reservatório entrem no poço. Se o fluido do reservatório entrar no poço, a equipe deve estar treinada para reconhecer o influxo e saber controlá-lo adequadamente, removendo o fluido invasor do poço. Muitos *blowouts* ocorreram, não por causa de uma má engenharia ou de um mau planejamento, mas por dificuldade da equipe em reconhecer corretamente um influxo e controlá-lo. (LIMA, 2006)

Fluidos de perfuração convencional são constituídos por uma mistura heterogênea de compostos orgânicos, inorgânicos e inertes. A composição é uma

variável que dita o nível de toxicidade do fluido. Apesar da eficiência do equipamento de remoção de sólidos, diluição contínua é necessária para manter o fluido utilizável. Um exemplo disso é que para todo barril de sólidos incorporado, uma diluição de dezenove barris é exigida para manter cinco por cento (5%) do total de sólidos ativos. Considerando esse como o limite superior de um fluido à base água, não é incomum se gerar milhares de barris de resíduos com uma variedade de níveis de toxicidade. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Por outro lado, a UBD requer a utilização de componentes naturais como gás e água. O inibidor de corrosão pode ser adicionado à fase líquida, ou lançado na coluna de perfuração. A perfuração, utilizando espuma, requer a adição de surfactantes³ e antiespumantes. As concentrações dos aditivos são muito baixas e normalmente não tóxicas. A maioria dos surfactantes usados como agente para gerar espuma são biodegradáveis. Como o gás é o maior componente, pouco desperdício é gerado se comparado com os fluidos de perfuração convencionais. Então os problemas de volume e toxidade são minimizados. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

A aplicação da UBD permite um total gerenciamento do poço, tanto em termos de controle de fluxo como em relação à medição e a avaliação de todo o retorno de fluidos e sólidos da perfuração. A UBD provou ser não somente segura em termos operacionais, mas também ter um custo compatível com o de um programa de perfuração convencional. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Embora a UBD ofereça muitas vantagens sobre a operação convencional, existem algumas desvantagens nessa técnica que podem impactar os programas de perfuração UB, tais como: problemas de estabilidade e consolidação do poço;

³ Surfactante significa um agente ativante de superfície (tensoativo). Um surfactante é um composto orgânico cuja estrutura molecular é formada por dois grupamentos distintos, que apresentam tendências opostas de solubilidade (hidrofílico e hidrofóbico) e cujo efeito ocorre na interface entre duas fases. São utilizados em fluidos de perfuração normalmente como: emulsificadores, espumantes, agentes umidificantes, detergentes, lubrificantes e inibidores de corrosão.

efeitos da contracorrente provocados pela embebição espontânea; possibilidade de novos danos na proximidade do poço; descontinuidade da condição *underbalance*; aumento do peso da coluna devido à redução da fluviabilidade; possibilidade de erosão excessiva do poço; aumento do torque e do arraste; esforços mecânicos adicionais, maior complexidade operacional; aumento dos riscos operacionais (com o aumento da pressão na superfície e o fluxo contínuo do poço durante a perfuração); necessidade de novos métodos de transporte e de disposição dos cascalhos; utilização de equipamentos especiais; aumento dos custos operacionais do poço, dependendo do tipo de sistema utilizado. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

A perfuração UB necessita de esforços adicionais de engenharia e de complexidade operacional devido aos novos requisitos de equipamentos e técnicas que irão atender a altas taxas de penetração e excessivo *drawdown*. Ela ainda é uma tecnologia cara. Dependendo do fluido de perfuração a ser utilizado, o custo pode ser significativo, particularmente para poços de grande alcance horizontal, bem como custos adicionais provenientes dos novos métodos de transporte e da disposição dos cascalhos. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Nem sempre é possível manter continuamente uma condição de *underbalance*. Como não há uma formação de reboco nas paredes do poço, qualquer ocorrência de uma situação de *overbalance* poderia causar um dano severo à formação desprotegida. Além disso, ela possui seus próprios mecanismos de dano, como por exemplo, dano da superfície da formação devido à falta de capacidade de condução de calor do fluido de perfuração *underbalanced*. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Apesar das desvantagens, a UBD pode servir como uma ferramenta adicional para as operadoras perfurarem e produzirem em reservatórios que não podem ser explorados por métodos convencionais de perfuração.

4 CRITÉRIOS DE ESCOLHA DE POÇOS CANDIDATOS

De uma forma geral, o estágio avançado atual que se encontra a tecnologia de perfuração *underbalance* tem sido o motivador principal para a consideração de utilização dessa tecnologia, nos estudos de projetos de poços. Entretanto, para a tomada de decisão sobre a perfuração de poços utilizando essa tecnologia UBD, uma série de critérios devem ser analisados. A seguir, serão descritos alguns dos principais critérios de avaliação especificados na literatura, que são considerados ferramentas importantes para esse processo de tomada de decisão..

4.1 Razões para Utilizar a UBD

Dentre as principais razões para se utilizar UBD pode-se citar: previsão da ocorrência de perda severa de circulação ou problemas de prisão de coluna; existência de reservatório muito *depletado* a ser atravessado pela trajetória do poço e com histórico de problemas durante a perfuração convencional; intervalos extensos de formações com rochas duras que resultam em baixas taxas de penetração e na diminuição da vida útil da broca, durante a perfuração convencional; cenário para ocorrência de danos à formação de interesse, que resultam em poços com baixo potencial produtivo; previsão de redução da capacidade de avaliar a produtividade da formação durante a perfuração convencional. (AL-AJMI, 2003; BLADE 2005)

Em geral, a presença de uma ou mais dessas razões é motivo suficiente para, no mínimo, considerar-se a utilização da UBD. Se nenhum dos problemas mencionados estiver presente, a probabilidade da operação de UBD ser utilizada é muito pequena.

Baseado na experiência e conhecimento do comportamento dos reservatórios e poços de petróleo é possível listar os indicadores para determinar se o poço é um bom candidato a UBD. A tabela, a seguir, mostra alguns indicadores e observações, que devem ser avaliadas no processo de seleção de um candidato à operação de UBD.

INDICADOR	OBSERVAÇÕES
Reservatório depletado	Normalmente apresenta problemas de perda de circulação e prisão diferencial. Se a formação for consolidada, torna-se um excelente candidato.
Fratura natural e formação com <i>vugs</i> (cavernas ou vazios grandes)	Normalmente apresenta uma enorme perda de circulação, o que pode aumentar os problemas de controle do poço ou aumentar o diferencial de pressão ou provocar a prisão mecânica, tornando-o um bom candidato a UBD.
Formação com rochas duras	É usualmente consolidada e pode suportar a UBD. Ele é um bom candidato por causa da melhora da ROP e da vida útil da broca.
Formação com alta permeabilidade	Mais uma vez, a presença da perda de circulação e da prisão diferencial o tornam um bom candidato.
Formação suscetível a dano devido à invasão de filtrado	A UBD irá reduzir e, possivelmente, eliminar este mecanismo de dano.

Tabela 2 - Indicadores pra seleção de poços candidatos.

4.1.1 Prisão de Coluna

A prisão da coluna em poços de petróleo é uma situação indesejável em uma operação de perfuração, pois pode acarretar elevados prejuízos como a suspensão das atividades e conseqüente atraso na conclusão do poço, gastos excessivos com o aluguel diário da sonda, possibilidade de perda do BHA (*Bottom Hole Assembly*) e até mesmo o abandono do poço.

A utilização de poços horizontais ou de grande inclinação e afastamento, denominados poços não convencionais, é uma alternativa no desenvolvimento e exploração de novos campos ou na recuperação avançada de campos marginais e/ou maduros. Contudo, apesar da alta tecnologia empregada e dos sucessos obtidos com essas soluções, há que se conviver com o aumento do risco de prisão da coluna. (SOUZA, 2003)

As principais causas da prisão de coluna podem ser classificadas em três categorias básicas: geometria do poço; presença de sólidos; prisão por diferencial.

A geometria do poço está relacionada a existência de problemas de projeto associados a trajetória do poço. Normalmente, a circulação de fluido pela coluna de perfuração é possível, mas em geral, o problema é a movimentação da coluna. (DEVEREUX, 1988)

A presença de sólidos está relacionada com as partículas sólidas presentes no poço. A hidráulica empregada deve ser suficiente para manutenção de uma boa limpeza do poço, removendo assim os sólidos em suspensão no fluido. O sistema de separação de sólidos na superfície deve também trabalhar com eficiência elevada, visando a remoção de parte dos sólidos incorporados ao fluido durante a perfuração. Caso a circulação no poço seja restringida ou não esteja no nível adequado, a limpeza do poço será ineficiente e aumentado o risco de prisão de coluna,

Usualmente, o problema ocorre durante uma manobra de retirada de coluna, quando não há circulação de fluido. (DEVEREUX, 1988)

A prisão por diferencial de pressão esta relacionada com a diferença de pressão entre a formação e o poço. Quatro condições são necessárias para que a prisão de coluna por diferencial de pressão ocorra: a presença de zonas permeáveis recobertas com reboco; uma *overbalanced* estática na formação; contato entre a parede do poço e a coluna de perfuração; a coluna permanecer estacionaria. (DEVEREUX, 1988)

A figura 4 apresenta um esquema em corte vertical e horizontal das forças atuantes no processo de prisão diferencial de coluna.

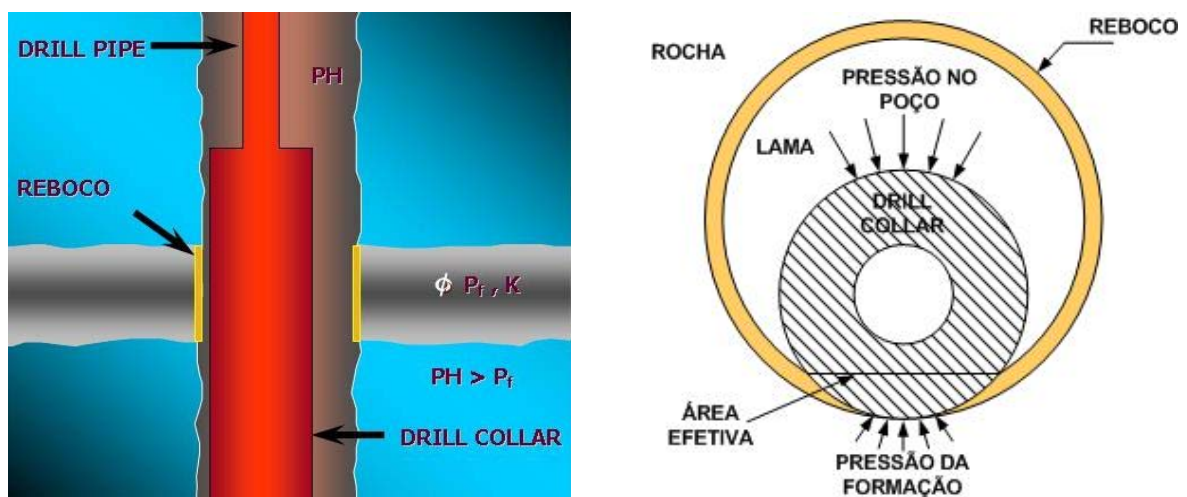


Figura 4 – Esquema de uma prisão diferencial.

Esse aprisionamento pode ser evitado com um melhor dimensionamento do fluido de perfuração, visando ao decréscimo rápido da permeabilidade do reboco. O fluido de perfuração tem como uma de suas funções controlar as pressões de subsuperfície para que não haja efeitos indesejáveis à perfuração como o aprisionamento da coluna.

Além disso, um crescimento demasiado da espessura do reboco pode levar a um torque excessivo durante a rotação da coluna ou a um arrasto excessivo da

coluna de perfuração quando for necessária uma manobra de retirada. Em casos de perfuração de poços não convencionais, o problema torna-se mais significativo devido à alta inclinação e ao afastamento do poço. (BLADE, 2005)

A força para se ter à coluna de perfuração livre dentro do anular é dada pela equação:

$$F_s = A_c \cdot \Delta P \cdot \mu_s \cdot 144 \quad (1)$$

Equação 1 – Força mínima necessária para liberar a coluna.

Onde:

F_s – força mínima necessária para liberar a coluna de perfuração (lbf);

A_c – área de contato (sq.ft);

Δp – diferencial de pressão através do reboco (psi⁴);

μ_s – coeficiente de fricção entre a coluna e a parede do poço.

Segundo a equação (1), se o diferencial de pressão através do reboco e o coeficiente de fricção entre a coluna e a parede do poço são minimizados, será necessário uma força menor para liberar a coluna.

A UBD elimina o reboco é o diferencial de pressão, pois a maior parte dos fluidos multifásicos não possuem sólidos pra produzir o reboco.

⁴ A diferença de pressão entre dois pontos de controle (ou conexões de tubulações) é a pressão diferencial. Uma designação de 10 PSID equivale a 10 libras por polegada quadrada de diferencial.

4.1.2 Perda de Circulação

A perda de circulação é causada por um fluxo incontrolável de fluidos para a formação devido ao diferencial de pressão causado pela *overbalanced*. É um problema comum na perfuração de reservatórios depletados, em formações com baixo gradiente de fratura, em formações naturalmente fraturadas, com alta permeabilidade ou com grandes *vugs*⁵, onde o grau de *overbalanced* é alto.

Ela gera prejuízo financeiro pela perda de significativos volumes de fluido para a formação, pelo custo dos materiais para remediar as perdas e pelo tempo não produtivo gasto no combate dessa perda. Essa parada pode levar à prisão da coluna e, algumas vezes, à perda total do poço. Neste caso, a UBD é vista como uma tecnologia facilitadora e, por isso, é fácil de ser justificada técnica e, em muitos casos, economicamente, também. (AL-AJMI, 2003, BLADE 2005)

4.1.3 Formação com Rochas Duras

Quando perfuramos formações de rochas muito duras, temos uma baixa taxa de penetração e diminuição da vida útil da broca, gerando um aumento significativo do custo do poço.

A baixa taxa de penetração (*Rate Of Penetration – ROP*) é causada pela pressão hidrostática do fluido de perfuração exercendo uma força contra a rocha. Essa força atua no fundo do poço e tende a segurar os grãos da rocha, requerendo

⁵ Caverna freqüentemente preenchida por minerais que apresentam uma composição diferente daqueles da rocha circundante. No caso dos reservatórios de petróleo esta caverna pode se apresentar vazia e ter dimensões diversas, desde pequenos espaços a imensas cavernas.

assim, um maior gasto de energia da broca para a perfuração ao mesmo tempo em que o reboco é depositado, esse deve ser removido mecanicamente pelos cortadores da broca quando a formação começa a ser perfurada. O sólido perfurado em conjunto com o sólido do fluido de perfuração impacta a taxa de penetração. (AL0AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Quando utilizamos a perfuração convencional, em um estado de *overbalance*, a pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração cria uma força sobre a rocha que está sendo perfurada, isso requer mais energia para a remoção da rocha perfurada ao mesmo tempo em que o reboco é depositado, nesse caso ocorre uma perda inicial do fluido de perfuração até que o reboco seja formado. Os cortadores da broca precisam remover esse depósito na formação para iniciar a penetração, o tipo de sólido perfurado e o conteúdo total de sólidos irão impactar a taxa de penetração da broca. As maiores culpadas desse impacto são as micro-partículas e não as grandes partículas. Na perfuração convencional, quando os cascalhos não são removidos pelo sistema de controle de sólidos, então, eles são re-circulados e re-introduzidos no poço e submetidos à remoagem. A redução do tamanho dos constituintes do fluido, em partículas coloidais, reduz a taxa de penetração. (BLADE, 2005)

O fluido de perfuração *underbalanced* é livre de sólidos, e os sólidos não são incorporados ao sistema de circulação para depois voltarem ao poço. Como já mencionado anteriormente, isto favorece o aumento da taxa de penetração. Além disto, como a pressão da formação é maior que a pressão dentro do poço, menos energia é gasta para perfurar e, conseqüentemente, obtém-se maiores taxas de penetração. Estas taxas obtidas quando perfuramos *underbalanced*, podem ser até dez vezes maiores do que as conseguidas com a perfuração convencional, numa mesma condição de poço. (BLADE, 2005)

O aumento na ROP é impactado pela permeabilidade da formação. Quanto mais baixa a permeabilidade, mais alto o impacto que a perfuração *underbalanced* terá sobre a ROP. A perfuração *underbalanced* também requer menos peso sobre a

broca que a perfuração convencional. A carga reduzida sobre os rolamentos em conjunto com uma maior ROP resulta em significativo aumento da vida útil da broca. (BLADE, 2005)

O trabalho realizado pela broca é representado pela seguinte equação:

$$W = 2\pi\tau + \frac{WOB \times ROP}{60RPM} \quad (2)$$

Equação 2 - Trabalho realizado pela broca.

Onde:

W – Trabalho realizado pela broca (lbf.ft / revolução);

τ - torque (lbf.ft);

WOB – peso sobre a broca (lbf);

ROP – Taxa de penetração (ft/hr);

RPM – revoluções por minuto.

Já o volume de rochas escavado por minuto é representado pela equação:

$$V = \frac{\pi.d_b^2.ROP}{240.RPM} \quad (3)$$

Equação 3 - Volume de rocha perfurada.

Onde:

V - volume de rocha escavada por revolução (ft³ / revolução);

d_b – diâmetro da broca (ft)

A energia mecânica específica é representada pela seguinte equação:

$$MSE = \frac{480\tau \cdot RPM}{d_b^2 \cdot ROP} + \frac{4WOB}{\pi d_b^2} \quad (4)$$

Equação 4 - Energia mecânica específica.

Onde:

MES – energia mecânica específica (psi).

τ – torque (ft-lbf);

ROP – taxa de penetração (ft/h);

RPM – velocidade de rotação da broca (rotação/ minuto);

WOB – peso sobre a broca (lbf);

d_b – diâmetro da broca (ft). (SCHUBERT, 2006).

A partir da literatura levantada, anteriormente, pode-se concluir que: o torque da broca não é função da pressão no fundo do poço; a taxa de penetração, geralmente, aumenta com a diminuição da pressão no fundo do poço; o MSE é, portanto, geralmente, menor que a menor pressão do poço; a taxa de desgaste das estruturas cortantes (em termos de distância perfurada) deve ser inversamente relacionada ao MSE.

Então, se a broca tiver de realizar menos trabalho para remover um determinado volume de rocha, seus elementos cortantes devem se desgastar menos e a broca deve perfurar uma maior distância quando utilizando a UBD. (SCHUBERT, 2006)

O aumento da vida útil da broca reduz o número total de brocas necessárias para perfurar o poço e, conseqüentemente, diminui o custo total com brocas e o número de manobras da coluna. Isso reduz o tempo e o custo total da perfuração de poços. É comum observar-se um aumento de 2 a 8 vezes da vida útil da broca. (BLADE, 2005)

4.1.4 Redução / Eliminação de Programas de Fluidos Caros

Fluidos convencionais de perfuração são compostos de vários produtos químicos que são adicionados a ele para controlar suas propriedades, como a viscosidade, e evitar a perda de fluidos. Em caso de perda em zonas de retorno, produtos químicos adicionais e partículas maiores são adicionados para controlar a perda. Para formações sensíveis, aditivos químicos não usuais podem ser requeridos para controlar o problema do dano à formação. (AL-AJMI, 2003)

Fluidos simples, como o cloreto de potássio (KCl), água ou óleo produzido, são tipicamente usados em perfuração *underbalanced*, então, programas de fluidos de perfuração caros podem ser eliminados para a seção do poço que for perfurado com essa tecnologia. (AL-AJMI, 2003)

4.1.5 Segurança e Meio Ambiente

Durante a perfuração convencional, o poço é projetado de tal forma que os fluidos do reservatório não entrem no poço. Se o fluido do reservatório entrar no poço (ocorrência de um kick), o sistema confia na equipe para reconhecer o influxo e controlar as pressões com o objetivo de remover do poço o fluido invasor originado da formação.

A maioria dos *blowouts* (perda de controle do poço seguido de erupção), ocorre não por falha de engenharia, mas por falha da equipe em reconhecer corretamente ou manusear apropriadamente o influxo, uma vez que ele venha a ocorrer. Portanto, um correto projeto de perfuração utilizando UBD, requer menos interferência da equipe. O sistema é projetado para assegurar o manuseio contínuo do influxo oriundo da formação. O sistema UBD, também, gera uma pressão de

retorno positiva mantida constante, que será monitorada durante a operação de perfuração. Devido ao fluxo contínuo de fluido da formação, a equipe deve estar sempre concentrada e alerta para qualquer desequilíbrio no sistema.

Um sistema fechado pode ser utilizado na perfuração *underbalanced*, este sistema, captura todos os fluidos e sólidos que retornam do poço e procede a separação e tratamento. Os fluidos são então re-circulados e enviados para a produção ou estoque. O sistema evita perdas maiores de fluido e minimiza o problema do descarte de efluentes. Além disso, os fluidos de perfuração utilizados na UBD exigem menos tratamento com aditivos químicos do que os fluidos convencionais, reduzindo os custos e a agressão ao meio ambiente.

4.1.6 Dano à Formação

Em nosso estudo é importante ter um entendimento do que é dano à formação e quais os seus mecanismos básico para podermos definir se a UBD pode ajudar a minimizá-los.

O volume total ocupado por uma rocha reservatório é a soma do volume dos materiais sólidos (grãos, matriz e cimento) e do volume dos espaços vazios existentes entre eles. O volume de espaços vazios é também chamado de volume poroso. (THOMAS, 2001) O volume poroso, também, é conhecido como porosidade, que pode ser ocupada por hidrocarbonetos e água.

Mesmo que uma rocha contenha uma quantidade apreciável de poros, e dentro desses poros existam hidrocarbonetos em uma quantidade razoável, não há a garantia de que eles possam ser extraídos. Para que isso ocorra, é necessário que a rocha permita o fluxo de fluidos através dela. (THOMAS, 2001)

Os fluidos percorrem o que se poderia chamar de “canais porosos”. Quanto mais cheios de estrangulamentos, mais estreitos e tortuosos forem esses canais porosos, maior será o grau de dificuldade para os fluidos se moverem no seu interior. Por outro lado, poros maiores e mais conectados oferecem menor resistência ao fluxo de fluidos. (THOMAS, 2001)

A medida da capacidade de uma rocha permitir o fluxo de fluidos é chamada permeabilidade da formação, ela influencia a queda de pressão visto que os fluidos do reservatório se movem das regiões mais externas do poço, dentro da área de drenagem⁶, em direção ao poço.

Na teoria, uma vez que essas propriedades são conhecidas, é possível prever a produtividade e a taxa de produção do poço. Tais prognósticos são usualmente confirmados e ou alterados durante o teste do poço, e constando de seu histórico. Contudo, a produção acumulada pode não estar de acordo com a expectativa inicial baseada no modelo do reservatório e das interpretações geofísicas da formação. Uma das razões para essa discrepância pode ser a ocorrência de dano à formação. (ROSA *et al.*, 2006)

O efeito película ou “skin” tem o objetivo de simular uma situação física causada por um fenômeno real: o dano (ou estímulo) à formação. Basicamente, o dano à formação ocorre devido a um dos seguintes fatores: (ROSA *et al.*, 2006)

- redução da permeabilidade absoluta da formação, causada pelo tamponamento dos canais de fluxo por sólidos em suspensão ou inchamento de argilas;
- redução da permeabilidade relativa do óleo, devido ao aumento da saturação de água ou gás;
- aumento da viscosidade do óleo por parafina, formação de emulsão etc.

Para exemplificar, imagine uma situação de poço danificado onde uma região ao seu redor se apresenta com uma permeabilidade alterada, conforme mostrado na figura 5.

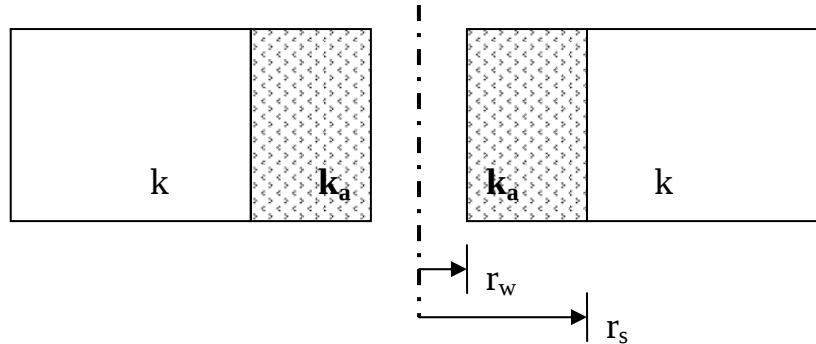


Figura 5 – Representação do dano à formação.

Caso a permeabilidade da região alterada (k_a) seja menor que a permeabilidade da formação (k), o fluido deverá despende uma quantidade de energia adicional ao atravessar a região alterada, ocorrendo, portanto, uma maior queda de pressão nas imediações do poço. (ROSA *et al.*, 2006)

Economide *et al* (1998) no seu livro “*Petroleum Well Construction*”, descreve o fator *skin*, relatado por Hawkins (1956), como uma simples expressão matemática representada por:

$$S = \left(\frac{K}{K_a} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (5)$$

Equação 5 – Fator Skin.

⁶ Processo onde ocorre a redução da saturação do fluido que molha o capilar (ROSA *et al.*, 2006)

Onde:

S – fator skin;

K – permeabilidade original (mDarcy);

K_a – permeabilidade alterada (mDarcy);

r_s – raio de drenagem (cm);

r_w – raio do poço (cm).

Podemos ver na equação 5 que quando $k_a < k$, o valor de s é positivo e a indicação é de dano à formação. Para $k_a > K$, o valor de s é negativo, indicando estímulo do poço. Quando $k_a = k$, o valor de s é nulo e a produtividade do poço é a original. (ROSA *et al.*, 2006).

Uma vez que o fator *skin* é determinado utilizando a Lei de Darcy, relaciona a vazão com a permeabilidade e o *drawdown*⁷, várias formas da equação de Darcy podem ser escritas, mas na sua essência, ela pode ser expressa pela equação 6:

$$q \propto \frac{k\Delta P}{\ln(r_s / r_w)} \quad (6)$$

Equação 6 - Lei de Darcy

Onde:

q – vazão (cm³/s);

ΔP – diferença de pressão (atm).

⁷ Segundo THOMAS (2001), a pressão de *drawdown* é definida como a pressão diferencial entre a pressão estática (pressão máxima do reservatório de petróleo em equilíbrio) e a pressão do fundo de poço (pressão de fluxo do fluido no fundo do poço), ou seja, quanto maior for o *drawdown*, maior será a vazão de produção, o carreamento de partículas e a produção de areia.

A equação acima mostra que a vazão (q), é proporcional à permeabilidade (K), e o *drawdown* (ΔP), é inversamente proporcional ao raio de drenagem (r_s) e ao raio do poço (r_w).

O efeito *skin* pode simplesmente ser incluído no denominador, modificando a lei de Darcy para:

$$q \propto \frac{k\Delta P}{\ln(r_s / r_w) + S} \quad (7)$$

Equação 7 – Lei de Darcy modificada.

No caso do efeito *skin* ser positivo significa uma redução da taxa de fluxo para um determinado *drawdown*, ou o aumento do *drawdown* por uma necessidade de taxa de fluxo.

A seguir uma amostra representativa de um testemunho com dano (*skin effect*).



Figura 6 - Dano à formação.

A seguir gráfico representativo do efeito *skin* na taxa de produção de poços.

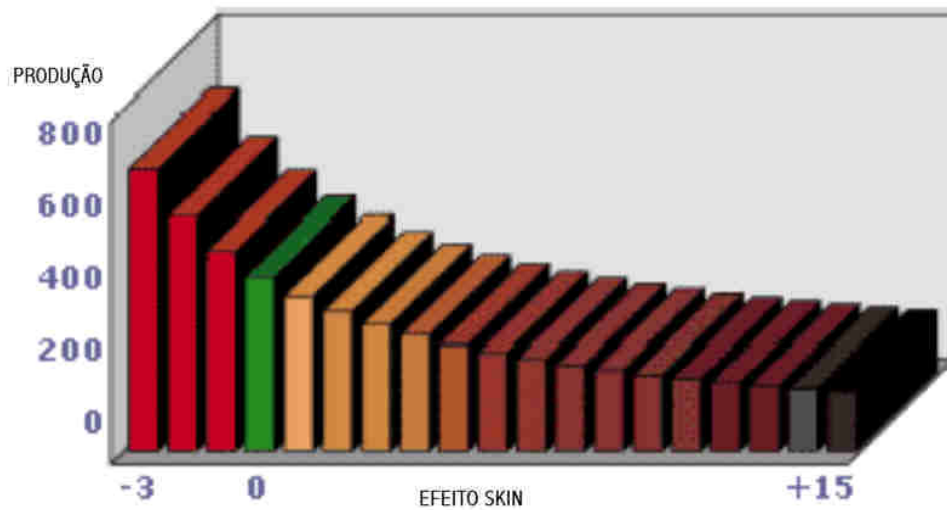


Figura 7 - Gráfico do efeito *Skin* na taxa de produção.

A redução do dano à formação melhora a produtividade do poço, gerando um grande impacto econômico no projeto de desenvolvimento do campo. Entretanto, a quantificação destes benefícios é difícil de se quantificar durante a fase de planejamento. No passado, o impacto na produtividade, gerada pela tecnologia UBD foi uma descoberta inesperada. O foco da utilização desta tecnologia estava centrado em outras razões, geralmente associado a resolver os problemas de prisão diferencial, de perda de circulação e de perfuração de formações duras. (BLADE, 2005)

Hoje, a prevenção do dano à formação, está em primeiro lugar, e é mais efetiva que a sua remoção, ou tentativa de remoção. Como a UBD, naturalmente, previne o dano à formação, essa é a razão evidente para que a UBD seja a única técnica escolhida. Entretanto, se severos danos à formação estiverem, constantemente presentes, ou esses problemas forem a causa da redução da produtividade do poço, a UBD pode não ser a solução. Na verdade, a UBD pode até causar danos à formação e agravar ainda mais os problemas. (BLADE, 2005)

4.1.6.1 Mecanismos de Dano à Formação

Assumindo que o dano é a causa da redução da produtividade, a seguir, serão discutidas, brevemente, algumas categorias gerais de danos à formação.

Um possível motivo para o dano à formação é a invasão de sólidos e filtrados nos poros da formação durante a perfuração *overbalanced*, ou devido a reações do material ou dos fluidos da formação com a fase líquida do fluido de perfuração, gerando um dano químico. (BLADE, 2005)

No estado UB, o conjunto de pressões leva o fluxo para dentro da formação, e o fluxo do filtrado, também, move os sólidos para a formação. Os sólidos podem reduzir a área aberta ao fluxo de alguns poros nas regiões próximas ao poço e, deste modo, causando um dano. A estratégia comum para redução deste dano é um projeto de fluido que gere, rapidamente, um reboco impermeável ao filtrado ao longo das paredes no interior do poço. (BENNION, 1995)

A figura 8 representa uma foto esquemática da redução da área aberta ao fluxo produzida pelo movimento de sólidos da lama para a formação.

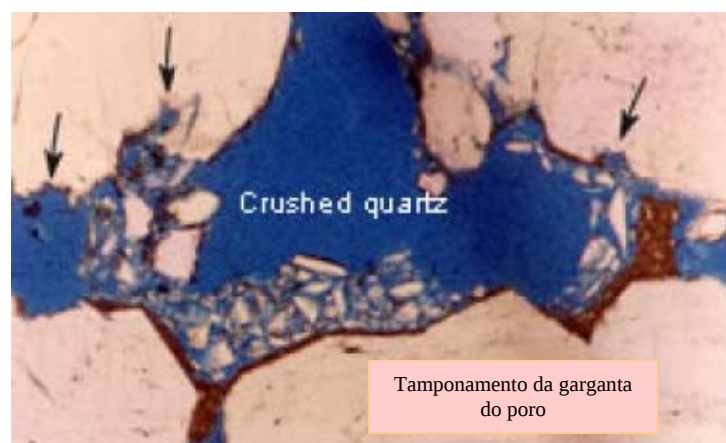


Figura 8 - Redução da garganta do poro.

A figura 9 representa esquematicamente os danos causados pelo filtrado do reboco e sólidos da lama.



Figura 9 - Danos causados por filtrado do reboco e sólidos da lama.

Contudo, a invasão e os danos estão limitados somente a uma fina camada ao redor do poço. Em revestimentos convencionais e completação *canhoneada*, o *canhoneio* se estende além do reboco, reduzindo o dano. Portanto o poço se comunica através dos *canhoneados* com uma formação não danificada, e o poço retorna a produção esperada. Pelo menos, isto é o que se espera. O reboco pode, também, ser dissolvido usando uma técnica de estimulação apropriada. (Al-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Em grandes formações fraturadas, como granitos fraturados, ou em grandes formações *vugulares*, como por exemplo, formações carbonáticas, isso pode não reduzir a possibilidade do assentamento do reboco. Em muitas situações semelhantes, os sólidos estão livres para se moverem nos espaços porosos e, portanto, podem causar um pequeno dano.

Entretanto, o dano é provavelmente moderado em situações semelhantes devido à invasão do filtrado, ou fase líquida, ou o tamponamento da garganta do poro quando o tamanho da fratura é reduzido.

A fase líquida do fluido de perfuração pode invadir moderadamente a formação, no modo *overbalanced*, isso porque ou o reboco não é formado, ou porque lama com sólidos livres é usada. Se a invasão for excessiva, por causa da perda de circulação no poço, ocorrerão também problemas de danos à formação. (AL-AJMI, 2003)

Quando a invasão do filtrado não for excessiva, ela pode causar dano à formação se ela for incompatível com o fluido ou com o tipo de rocha da formação. A fase líquida pode reagir com o fluido da formação causando descamação, precipitação ou formação de emulsão que podem causar significantes danos à formação. Ainda que ela seja compatível, o filtrado pode ficar *trapeado* nos poros da formação, isto é, ditado pela saturação inicial, tensão superficial, molhabilidade⁸ e pressão capilar dentro da formação permeável. (BENNION, 2000)

O *trapeamento* dos fluidos é um problema mesmo na fase aquosa do líquido nos fluidos da formação. Quando o dano à formação é causado pelo *trapeamento* da fase aquosa dos fluidos da formação, o mecanismo de dano não pode ser reduzido ou eliminado usando-se a UBD. O líquido *trapeado* deve ser retirado utilizando-se outros meios, como a injeção de fluidos ou mudança do líquido utilizado. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Aditivos químicos, usados para melhorar as propriedades dos fluidos de perfuração, podem ser a causa dos danos durante a perfuração *overbalanced*, pela oclusão ou invasão dos poros. As rochas da formação podem reagir com a fase

⁸ Molhabilidade pode ser definida como a tendência de um fluido se espalhar ou aderir a uma superfície sólida na presença de outros fluidos miscíveis.

Um reservatório petrolífero, constituído de arenito e/ou calcarenito, pode ser molhável pôr óleo ou água, dependendo das características físico-químicas do óleo e da parede dos poros do reservatório. Normalmente os reservatórios petrolíferos são molháveis pôr água. Nos reservatórios cuja porosidade esta nas fraturas, geralmente o fluido molhante é o óleo. (ROSA, 2006)

líquida do fluido de perfuração, desmoronando ou, de outro modo, obstruindo os poros e causando dano e/ou outros problemas de perfuração. (BLADE, 2005)

O potencial dano à formação por invasão é, usualmente, determinado por testes de laboratório feitos nos testemunhos, e testes dos fluidos da formação com os possíveis fluidos de perfuração, sem levar em consideração se o poço será perfurado *underbalanced* ou *overbalanced*. Se o dano por invasão for quem mais contribui com o *skin*, a UBD uma possível solução, desde que a formação seja adequada para essa tecnologia. Tipicamente, altas permeabilidades, formações consolidadas, como as naturalmente fraturadas ou formações *vugulares*, encaixam-se nessa categoria. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Dano por invasão à formação pode, também, ser corrigido ou reduzido usando-se técnicas convencionais de estimulação, como acidificação e fraturamento hidráulico, na tentativa de remoção do dano, no primeiro caso, ou criar um acesso do interior do poço até as formações não danificadas, logo após a região de dano. Tais técnicas podem ser consideradas e comparadas com a UBD, antes de se determinar a utilização ou não dessa tecnologia.

Deve-se, também, lembrar que se a UBD for considerada em um provável cenário de poço susceptível a danos por invasão da formação, um grande cuidado deve ser tomado para evitar *overbalanced*, durante o processo de perfuração e completação. Um poço perfurado em *underbalanced* não está protegido pelo reboco, e qualquer situação de *overbalance* pode conduzir a uma grande invasão e dano, dos quais o poço é incapaz de se proteger. Nesse caso, todas as vantagens da UBD podem ser perdidas e, no final, o resultado da perfuração pode ser ainda pior que o resultado convencional. (AL-AJMI, 2003; SCHUBERT, 2006)

4.1.7 Avaliação da Formação

A UBD tem a vantagem de possibilitar a avaliação da formação e dos líquidos contidos nela em tempo real. Quando uma formação permeável é perfurada *underbalanced*, os fluidos contidos nela serão produzidos. O monitoramento da produção dos fluidos do poço irá permitir a realização da análise da formação e a composição dos fluidos irá dar a indicação do índice de produtividade da formação. (BLADE, 2005; SCHUBERT, 2006)

O uso da UBD reduz a necessidade do teste de avaliação da formação. Isso também ajuda a eliminar testes desnecessários de formações não produtivas e assegurar que zonas portadoras de hidrocarbonetos não serão ignoradas. Reduz, ainda, o custo total do poço. Algumas empresas estão atualmente utilizando UBD em exploração e *exploração* de poços para melhorar as suas técnicas de avaliação de formações e reduzir o custo total do programa de exploração. (BLADE, 2005)

4.2 Razões para não utilizar UBD

Como foi dito, UBD não é uma tecnologia que deve ser utilizada em todas as situações. A utilização dessa tecnologia em cenários não apropriados pode criar uma situação insegura, aumentando o dano à formação, aumentando a probabilidade de falha do poço ou aumentando o custo do poço o que pode gerar um projeto economicamente inviável. A tabela 3 mostra os indicadores e comentários para situações a serem consideradas em poços não candidatos a UBD.

Indicadores	Observação
Reservatório com baixa qualidade	A UBD não pode produzir algo que não exista.

Indicadores	Observação
Alta pressão de poros associada à alta permeabilidade da formação	É fácil perfurar <i>overbalanced</i> . Condições UB são fáceis de serem atingidas, mas as taxas podem também serem altas, conduzindo a excessivos <i>drawdowns</i> e gerando requerimentos dos equipamentos de superfície impraticáveis.
Poço raso	Dificuldade de controlar a pressão no fundo do poço e assegurar a continuidade da condição <i>underbalanced</i> .
Argilas expansivas e formações instáveis	Problemas de estabilidade do poço se perfurado <i>underbalanced</i> .
Formações suscetíveis a embebição espontânea	UBD pode aumentar o dano à formação.
Poços onde se realizam freqüentes manobras	Pode-se criar excessiva oscilação entre condições <i>underbalanced</i> e <i>overbalanced</i> causando danos e eliminando as vantagens da UBD.
Candidatos que requerem a utilização da UBD para um longo intervalo	Embora UBD possa ser realizada com êxito, o <i>drawdown</i> no interior do poço aberto a partir da sapata pode ser muito alto quando a broca está perto de chegar a um longo intervalo, isso gera requisitos operacionais além dos limites dos equipamentos de superfície.
Pouco ou nenhum conhecimento da pressão da formação	A pressão do reservatório será arbitrada no projeto UBD.
Poços com elevado índice de H ₂ S	Produção de fluidos com elevado índice de H ₂ S irá dificultar o projeto do sistema UBD e pode apresentar riscos à segurança.

Indicadores	Observação
Seção do poço com variação de pressão	A perfuração de seções que contenham formações com uma grande variedade de pressão na formação, pode requerer normalmente requisitos operacionais além dos limites dos equipamentos de superfície.
Formações suscetíveis à <i>conicidade</i> ⁹ ou à migração de finos	UBD pode criar um <i>drawdown</i> excessivo, o qual pode aumentar a <i>conicidade</i> e o problema da migração de finos.

Tabela 3 - Indicadores de poços não candidatos.

4.2.1 Reservatório com Baixa Qualidade

Discutido anteriormente, a UBD pode melhorar a *performance* do reservatório, se a razão para o poço estar produzindo com baixo potencial for causada por dano à formação. Ao contrário, UBD não é uma resposta para poços com baixa produção, em razão da baixa qualidade do reservatório. A UBD não pode produzir algo que não exista. Em muitos casos, usa-se a UBD em reservatórios de baixa qualidade com o intuito de melhorar a taxa de produção. Isso só irá aumentar o custo da perfuração do poço, com um pequeno ou nenhum benefício produzido por essa tecnologia. (BLADE, 2005)

⁹ A *conicidade* ocorre quando o contato óleo/água ou óleo/gás eleva-se mais nas imediações de um poço produtor, provocando com isso um aumento na razão água/óleo (RAO) ou gás/óleo (GAO), com conseqüente perda de produção. (ROSA, et al, 2006)

4.2.2 Alta Pressão de Poros e Alta Permeabilidade da Formação

Condições *underbalanced* podem ser facilmente alcançadas, enquanto que a UBD pode ser impedida devido a limitações dos equipamentos de superfície. A máxima pressão de superfície permitida (MASP) é mais alta em reservatórios com alta pressão. Por exemplo, para formações com alta pressão, atualmente só existem RBOP's (*Rotating Blowout Preventer*) que suportam no máximo 5.000 psi. Então perfurar formações que possam apresentar um MASP muito alto é extremamente arriscado. Se o reservatório tem uma permeabilidade alta é provável que os volumes do influxo sejam muito grandes. Os equipamentos de superfície devem ser projetados para controlar esse grande volume de retorno. Como resultado dessas características, é provável que altas pressões combinadas com altas permeabilidades da formação gerem propostas de UBD arriscadas. (BLADE, 2005)

4.2.3 Poços Rasos

O custo com a perfuração e completação de poços rasos é normalmente pequeno (na faixa de US\$ 50.000). Então, é muito difícil justificar o custo extra de equipamentos de UBD. Por exemplo, a montagem e a desmontagem dos equipamentos de UBD, que pode levar até 3 dias, com um custo em torno de US\$10.000 por dia, o que pode ser muito difícil de ser justificada economicamente. (BLADE, 2005)

Mesmo que os resultados econômicos justifiquem a UBD, alcançar uma situação *underbalance* estável é difícil. Formações rasas têm pressões de reservatório mais baixas, então fica muito difícil manter uma *underbalance* fixa devido à pequena margem disponível. Por exemplo, é mais difícil manter uma

underbalance fixa de 100 psi em um reservatório de 500 psi do que em um reservatório de 5.000 psi.

4.2.4 Estabilidade do Poço

Levando-se em conta uma série de premissas existentes para se considerar a utilização da UBD, a estabilidade do poço, na perspectiva da formação, deverá ser considerada para avaliar se a técnica de UBD é aceitável.

Por definição, um poço *underbalance* irá requerer no anular uma pressão menor que a pressão da formação. Isso pode causar falha na parede do poço, em formações que são suscetíveis a problemas de estabilidade, levando ao seu colapso. A estabilidade do poço é, também, uma vasta área que merece maior detalhamento.

O processo de perfuração de um poço altera o estado de tensões nas formações rochosas atravessadas pela broca. O material removido pela escavação é substituído pelo fluido de perfuração que, entre outras funções, tenta restabelecer o equilíbrio anterior à escavação. Contudo, isso nem sempre é atingido e, como consequência, algum tipo de ruptura será gerado na região circunvizinha à parede do poço. Basicamente os dois tipos de rupturas que ocorrem ao redor de poços são as fraturas e os colapsos. (BONELLI, 2006)

As fraturas são caracterizadas por uma ruptura à tração do material rochoso, enquanto que os colapsos são caracterizados por uma ruptura à compressão, conforme mostra a figura 10. Os colapsos ocorrem devido ao cisalhamento provocado por um par de tensões desiguais ao redor do poço, gerando regiões de material plastificado que, eventualmente, torna mais larga a seção transversal do poço. Tal fato, a não ser que seja previamente especificado no projeto (ARAÚJO et al., 2004), na maioria das vezes é indesejado, pois se o material

plastificado desprender-se da parede do poço, maior será o risco de aprisionamento da coluna de perfuração, devido à maior disposição de cascalhos na parte inferior do poço, principalmente, se esse for inclinado.

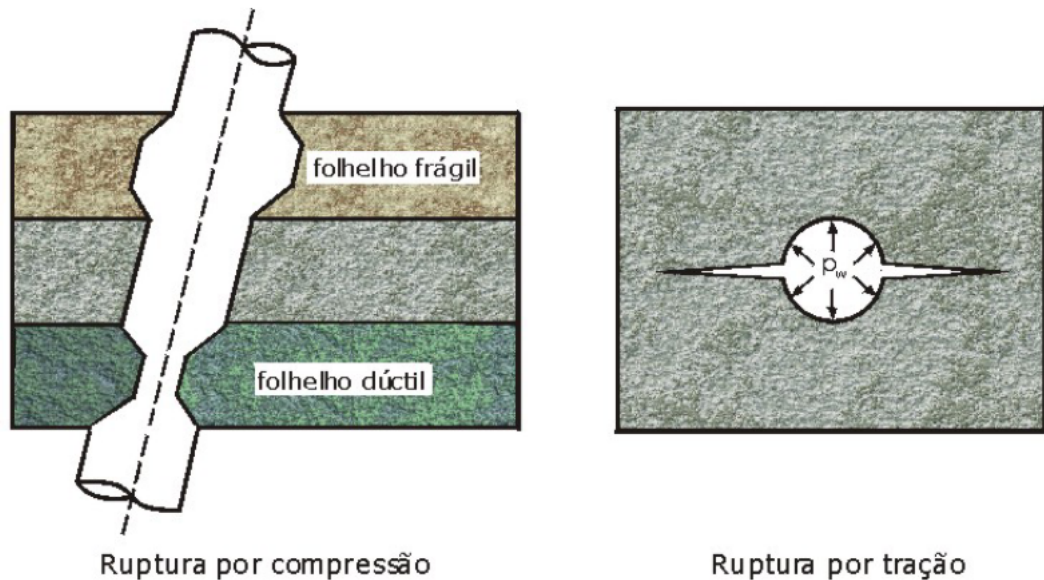


Figura 10 - Tipos de ruptura ao redor de poços (Fjær et al., 1992)

Entretanto, a ruptura por tração constitui-se a mais crítica, já que ao ser gerada uma fratura, há uma perda do fluido de perfuração do interior do poço para a formação rochosa, podendo gerar colapsos em regiões superiores ainda não revestidas. No caso da formação possuir gás, é possível que esse flua para o interior do poço e, se esse fluxo não for controlado, poderá resultar num *blowout*. (VILLARROEL, 2006)

Algumas formações “*in situ*” estão sujeitas a um estado de tensão ditado por sua posição, natureza e tensão de sobrecarga. Na ausência de um poço, a formação somente responde às mudanças tectônicas e geológicas, numa determinada escala de tempo geológica. Quando um poço é perfurado, nesse tipo de formação, ele remove o confinamento original e introduz novos campos de tensões nas imediações do poço. (BONELLI, 2006)

Em uma análise de estabilidade, o estado de tensões “*in situ*” e as características de resistência mecânica da rocha são os dois fatores mais relevantes para a estabilidade durante a perfuração de um poço. A importância é tão grande que, em algumas ocasiões, é necessário redefinir a localização do poço, a fim de se encontrar uma direção que permita uma perfuração otimizada. (BONELLI, 2006)

A seguir, a figura 11 apresenta típicas ocorrências de instabilidade de poços durante a perfuração (CSIRO, 2005, apud Bonelli, 2006). Em função do estado de tensões “*in situ*”¹⁰, é possível estabelecer condições de estabilidade através da alteração da orientação do poço.

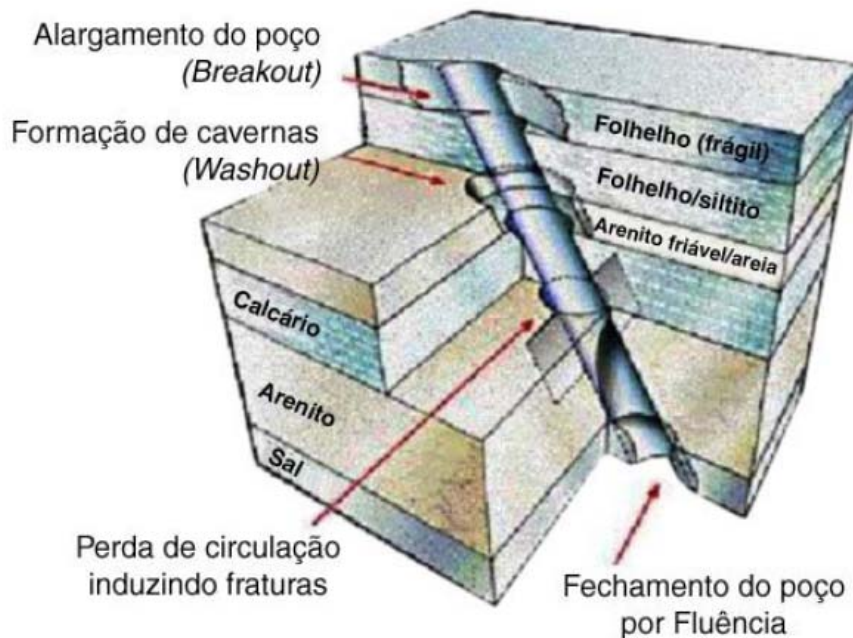


Figura 11 - Típicas ocorrências de instabilidade de poços durante a perfuração

Assim que o poço alcança a profundidade onde a formação pode apresentar problemas, devido ao estado alterado das tensões, ele desmorona. O papel do fluido na UBD é o de exercer pressão na formação para mantê-la no lugar.

¹⁰ É a tensão nas rochas, na ausência de qualquer perturbação causada pelo homem, resultante de complexa interação entre ações de esforços gravitacionais, esforços tectônicos, efeitos térmicos e processos físico-químicos. (BONELLI, 2006)

A UBD deve manter a pressão do fluido entre a pressão de poros e de fratura da formação. Se a pressão do fluido exceder a pressão de fratura, a formação torna-se instável, e pode ocorrer uma falha. Fluidos possuem seus próprios problemas, impondo uma carga à formação, alterando a força capilar dentro dos poros, possibilitando a reação com as rochas da formação e causando dano por invasão. Além disso, a pressão exercida pelo fluido não é constante, e varia com os efeitos de *surge*¹¹ e *swab*¹², alterando a densidade do fluido, e a diferença entre as densidades de circulação e de estática (ECD¹³). Assim, a face exposta da rocha está sujeita à carga cíclica de todo o processo de perfuração, cimentação, completação, e à produção. Até mesmo durante a UBD, o poço está sofrendo carga, embora essa, nesse caso, seja direcionada para dentro do poço, e é considerada uma carga ativa, em oposição à passiva em *overbalanced*. A resposta da rocha, que se encontra na formação, a essa carga é função de suas propriedades químicas e mecânicas. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Engenheiros que projetam poços se preocupam com a estabilidade do poço e, normalmente tentam planejar com o objetivo de manter o poço estável por muito tempo, até que um revestimento seja cimentado no local e crie um suporte estrutural à formação exposta. Às vezes, isso pode não ser suficiente, em formações plásticas como domos salinos e camadas de depósitos carboníferos, onde pode ocorrer o fluxo transversal ao revestimento causando nelas tensões severas, ou abrandamento e compactação que podem causar uma fluidez plástica na formação provocando o colapso do revestimento. Vários modelos de estabilidade de poço estão sendo desenvolvidos, nos últimos tempos, para ajudar a determinação dos estados de tensões próximos ao poço e a sua possibilidade de falha. Em geral, esses modelos teoricamente determinam os campos de tensão próximos ao poço, baseado em informações sobre as propriedades das rochas, poços e informações

¹¹ Indução de pressão devido à movimentação da coluna de perfuração para dentro do poço.

¹² Indução de pressão devida à movimentação da coluna de perfuração para fora do poço.

¹³ A pressão no fundo do poço acrescida das perdas de carga do anular, quando se está circulando.

$$ECD = \rho_{eq} = \frac{Ph + \Delta P}{F_c * h}$$

sobre pressões de fratura, e carga imposta pelos fluidos e pressões, e usando um critério de falha, predizem a deficiência da formação. Isso não é diferente do projeto de tubos, onde se compara a carga de resistência do material, usando um critério de falha. Muitos desses modelos usam a teoria elástica linear para prever a falha. (BLADE, 2005)

Muitos problemas de estabilidade de poços ocorrem em formações com folhelhos. Mas “folhelho” é um termo muito genérico, abrangendo formações muito consolidadas e estáveis, formações que reagem com a fase aquosa e expansiva, e formações que são muito macias. Contudo, a instabilidade mecânica do poço pode ser examinada para todas as formações, sujeitas a *underbalanced*. Em UBD, uma pressão ativa é aplicada na formação podendo induzir o colapso ou uma falha por instabilidade da formação. Portanto, a estabilidade do poço pode colocar um limite superior possível de *drawdown* durante a UBD, o qual pode eliminar alguns possíveis candidatos a serem considerados. Por exemplo, formações com altas taxas de permeabilidade podem gerar um grande *drawdown* assim que a *underbalanced* é iniciada. Esse alto *drawdown* não é o único a gerar uma demanda excessiva sobre o sistema de superfície, mas também pode gerar instabilidade do poço. Porém, em favor da UBD existe o fato de que, se corretamente projetada e executada, a operação UBD limita as tensões cíclicas atuantes no poço, enquanto ajuda a sua estabilidade. (BLADE, 2005)

Falhas mecânicas podem ser causadas devido a vários modos de falhas. Falha por tração ocorre quando a tensão efetiva do poço exceder a força de tração da formação. Isso normalmente ocorre quando o gradiente de fratura for menor que o peso da lama e, é improvável de ocorrer durante a UBD, embora muito provável de ocorrer em perfuração *overbalanced* se o peso da lama não for corretamente projetado, ou se numerosas fraturas naturais existirem na formação no início da perfuração; em outras palavras, a pressão de poro e a de fratura forem idênticas. (BLADE, 2005)

Falha por cisalhamento ocorre quando a concentração de tensão, devido ao poço, é semelhante a da rocha que pode lascas ou desprender-se na região próxima ao poço, caindo no poço e causando uma abertura muito maior que o diâmetro da broca. Uma condição UB pode conduzir ao cisalhamento da formação se a força de cisalhamento for baixa como em alguns folhelhos ou arenitos. (BLADE, 2005)

O peso do fluido de perfuração é um dos parâmetros de controle que limitam a falha mecânica. O peso do fluido de perfuração deve ser tal que a máxima tensão exercida por ele na formação não induza uma fratura e nem uma diminuição da resistência da formação, mas deve ser maior que a mínima pressão para substituir os efeitos de tensão decorrente dos materiais confinados removidos pela perfuração. Se um peso de lama maior que a pressão de poros for requerida para conter a instabilidade mecânica, que ocorre em algumas formações de folhelhos, a formação não será uma boa candidata. (BLADE, 2005)

4.2.5 Argilas Expansivas

Danos por indução química são comuns em muitas formações argilosas. Argilas expansivas absorvem a fase aquosa do fluido, incham, e experimentam uma tensão localizada elevada causando uma falha e o colapso do poço. Esse dano pode ser mitigado pelo uso de salmoura ou outro fluido apropriado, como lamas à base-óleo. Um aditivo comum que limita o inchamento das argilas é o cloreto de potássio (KCl). De qualquer modo, algumas argilas trocam íons com o fluido de perfuração, assim alteram o PH, e com essa reação ocorre o inchamento e a falha. Em geral, tal formação, a menos que muito consolidada, não será uma boa candidata a UBD. (BENNION, 1996)

Algumas vezes, uma formação *depletada* considerada boa candidata está intercalada com folhelhos, criando situações onde uma baixa pressão de fundo

(Bottom Hole Pressure –BHP) é necessária para UBD, enquanto altas pressões são necessárias para o folhelho. Em tais casos Nesse caso, a utilização da UBD pode não ser possível no estado corrente da tecnologia. Se a intercalação de folhelhos apresentar pressões de poros próximas à da zona produtora, será possível o planejamento da operação de perfuração dessa formação próximo ao equilíbrio das pressões, se a UBD for indicada por outras razões. (BLADE, 2005)

4.2.6 Dano por Embebição Espontânea

Em alguns reservatórios, a matriz próxima da região do poço é embebida pela fase líquida do fluido de perfuração, mesmo se a direção principal do fluxo for à dos fluidos da formação para o poço, como durante as perfurações *underbalanced*. A causa física de tal embebição¹⁴ é o gradiente de capilaridade dos poros da formação em oposição à formação que “suga” a fase líquida do fluido de perfuração. Uma analogia simples do efeito de capilaridade é a ação capilar em um canudo inserido em uma garrafa de líquido. Se o diâmetro do canudo for reduzido, o líquido sobe através do canudo sem nenhuma pressão de sucção aplicada em sua ponta exposta, isso é causado pela ação capilar. Será criada, então, uma pressão capilar com essa analogia da redução do diâmetro do canudo. Dependendo da tensão superficial água-ar e a tendência de molhabilidade da água na superfície do canudo, o líquido sobe através do canudo.

¹⁴ Processo onde ocorre o aumento da saturação do fluido que molha o capilar preferencialmente a um outro fluido. Como as rochas que compõem os reservatórios de petróleo possuem poros com vários diâmetros e configurações geométricas, indicando, portanto, que a distribuição dos fluidos, quando da descoberta de um reservatório de hidrocarbonetos, ou o comportamento deles durante a vida produtiva do reservatório, depende do processo de saturação, isto é, se o processo de saturação é de embebição ou de drenagem. (ROSA, et al., 2006).

De uma maneira análoga, devido à pressão capilar nos poros, a fase líquida em contato com a formação será embebida por ela se fase líquida molhar preferencialmente essa formação.

A formação não embebe o líquido se:

1. Ele não molhar a formação.
2. A formação já estiver totalmente saturada pela fase líquida.
3. Existir um filtro impermeável para inibir a embebição.
4. A contra pressão, isto é o *drawdown*, é mantida para exceder a pressão capilar inicial de saturação da água.

A seguir, é mostrada no gráfico da figura 12 a relação da pressão capilar. Se a saturação inicial da formação for o ponto mostrado no gráfico da figura 12, a pressão capilar inicial indicada existe para ajudar a embebição. Mas, se um diferencial de pressão *underbalanced* for ajustado a maior do que essa pressão capilar inicial mantida no poço, a contra pressão excede a pressão capilar inicial e, então, não irá ocorrer a embebição. Note-se a aproximação assintótica da curva para um percentual de saturação irreduzível. Se a saturação inicial for maior do que a saturação irreduzível, então, a formação irá sempre embeber em oposição a alguma magnitude de contra pressão. (BLADE, 2005)

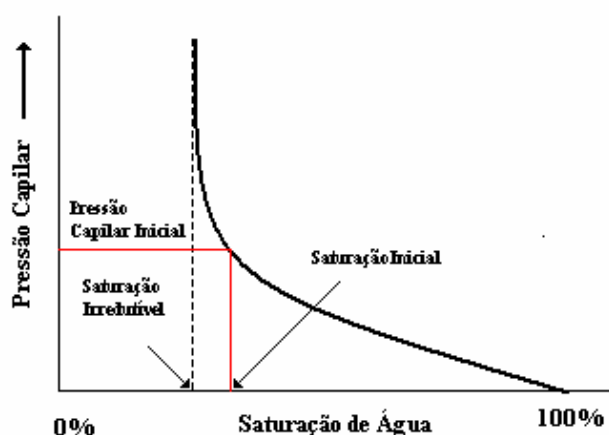


Figura 12 - Gráfico da relação entre saturação e pressão capilar.

Em operações *overbalanced* corretamente projetadas, o reboco cria uma barreira impermeável a embebições. De qualquer forma, em UBD, na ausência do reboco, a única maneira para limitar a embebição é manter um adequado diferencial de pressão *underbalanced*, que não será possível se a saturação inicial da formação for menor que a saturação irreduzível. Conseqüentemente, formações nas quais o *drawdown* de *underbalanced* não pode ser mantido igual à embebição espontânea, serão eliminadas como boas candidatas a utilização da UBD. Isso porque a UBD pode aumentar o dano nessas formações.

4.2.7 Movimentação Freqüente

Um sistema UBD é dinâmico. Algumas vezes, o fluxo é interrompido, então, oscilações de pressão irão ocorrer no poço. Essas oscilações, se surgirem, podem aumentar a possibilidade de ocorrência do dano à formação.

4.2.8 Longos Intervalos

A pressão anular aplicada sobre a formação é uma combinação da pressão hidrostática e perda de pressão por fricção. A pressão anular aplicada se altera constantemente ao longo do poço, baseada na profundidade e comprimento do poço. Como mostrado no gráfico da figura 13, se a pressão do reservatório é constante, o diferencial entre a pressão anular e a pressão da formação irá aumentar com o aumento do comprimento do intervalo. Se o comprimento do intervalo for longo, uma tentativa de manter um intervalo completo em estado de *underbalanced* pode gerar um *drawdown* excessivo. Isso pode conduzir a limites impraticáveis dos

equipamentos de superfície, causando a migração de finos ou gerando dano pela formação de cone¹⁵. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

Uma tentativa de controle do *drawdown*, em um longo intervalo, irá levar no caso de uma condição *underbalanced* na sapata a uma condição *overbalanced* no fundo do poço. Dependendo da energia da formação, isso pode levar o poço a fluir na sapata e perder fluido no fundo. Essa condição pode dificultar o reconhecimento de zonas produtoras e levar a prisão da coluna em poços com limpeza ineficiente.

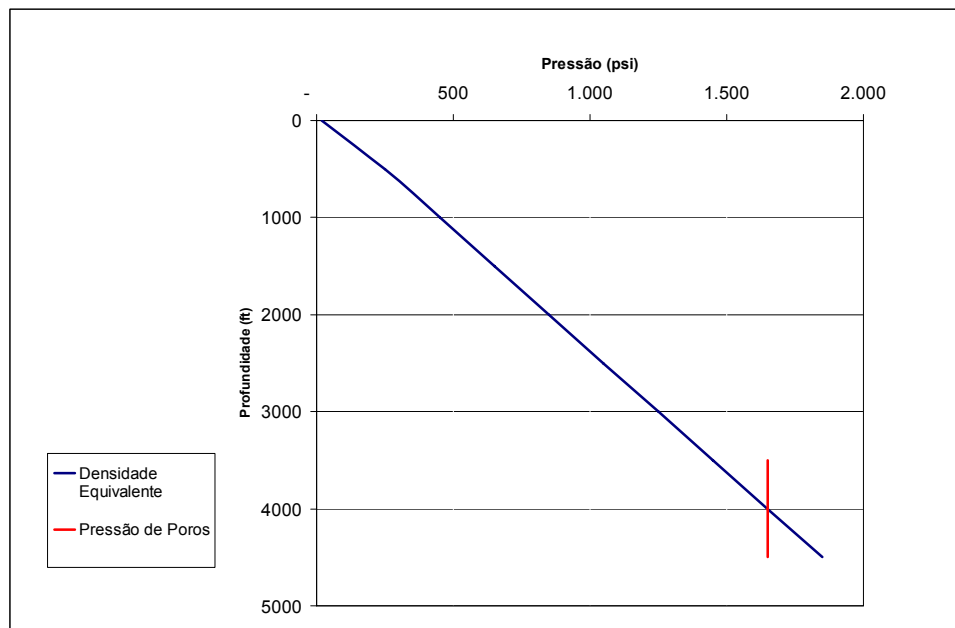


Figura 13 - Gráfico da Pressão de circulação equivalente e da pressão de reservatório x Profundidade.

¹⁵ É um movimento essencialmente vertical da água na formação. Ela não ultrapassa barreiras pouco permeáveis e ocorre normalmente em pequenas distâncias. (THOMAS, 2001).

4.2.9 Pouco Conhecimento da Formação

Perfurar poços UBD, quando se tem pouco conhecimento da formação e de suas pressões, é um risco elevado. Conhecimento da formação é necessário para se obter a susceptibilidade do poço à falha de estabilidade. Os dados, também, são requeridos para determinar as necessidades técnicas e os requerimentos de projetos dos equipamentos de superfície. (BLADE, 2005)

4.2.10 Variação da Pressão da Formação

Certas formações possuem um amplo diferencial de pressão de poros. Usualmente, tais formações são intercalações de formações duras impermeáveis como os folhelhos. *Underbalanced* pode ser obtida em formações com baixa pressão, mas isso irá resultar em um grande *drawdown* em uma formação com alta pressão. Isso pode gerar problemas de controle do fluxo adicionados à passagem de fluxo através da formação, como resultado dos gradientes de pressão. Como mencionado anteriormente, folhelhos normalmente separam formações com amplas variações de pressão de poros. Esses folhelhos podem se expandir e causar sérios problemas de estabilidade do poço. (AL-AJMI, 2003; BLADE, 2005)

4.2.11 Alto Índice de H₂S

A preocupação principal enquanto se perfuram formações portadoras de H₂S é a segurança. Como o gás sulfídrico causa a fragilidade por hidrogênio, os tubos de perfuração devem ser escolhidos com cuidado. Por exemplo, quando o

tubo flexível for feito de um aço forjado a frio, esse não poderá ser utilizado. Grandes acidentes no Canadá foram registrados durante a UBD, quando se utilizaram tubos flexíveis. Como resultado, as autoridades reguladoras de alguns países, como o Canadá, impuseram a proibição de seu uso em UBD em formações com H₂S. (BLADE, 2005)

Desnecessário acrescentar que perfuração em formação com H₂S gera maiores exigências dos equipamentos de controle na superfície. O *Mud Cap Drilling* (MCD)¹⁶ é uma possível alternativa para perfurar formações com gás sulfídrico no estado de UB. De qualquer modo, o sucesso da técnica MCD baseia-se na disponibilidade de uma zona de perda em que os fluidos e os cortes possam ser injetados. Há sempre a possibilidade de se criar zonas de perda utilizando fluidos de fraturamento na parte superior da zona. De qualquer forma, isso depende da geração de cortes que pode ser limitada. Essa geração pode impedir o uso da técnica MCD. (BLADE, 2005)

4.2.12 Dano por Formação de Cone

Gás ou água podem gerar um cone dentro do reservatório de óleo durante a produção se o *drawdown* for excessivo, isso significa uma alta taxa de produção. Esse é um problema no gerenciamento de reservatórios e é uma das razões do controle das taxas de produção. Em UBD, ou devido à natureza da formação do reservatório, como alta permeabilidade e alta taxa de produção, excessivo *drawdown* pode ser gerado, o que irá acelerar e até mesmo causar uma formação excessiva de

¹⁶ É uma técnica de perfuração utilizada em poços que estão em *kick* e com perda de circulação ao mesmo tempo. Neste caso você deve circular o fluido pelo anular criando uma contrapressão na zona de *kick*, enquanto os cascalhos que estão sendo gerados sobem com o fluido e entram na zona de perda e permanecem lá. O gás e o óleo continuam fluindo e migram para a cabeça do poço, então este fluxo é controlado e o gás é separado na superfície.

cone, alterando a molhabilidade de toda a formação, conduzindo a um significativo e, talvez permanente, dano à formação. Então a tendência de geração de cone deve ser considerada ao se avaliar um candidato a UBD. (BLADE, 2003; ROSA, 2006)

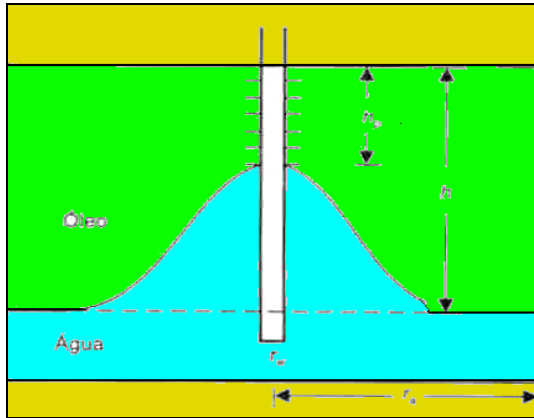


Figura 14 – Cone de água em um reservatório de óleo com aquifero.

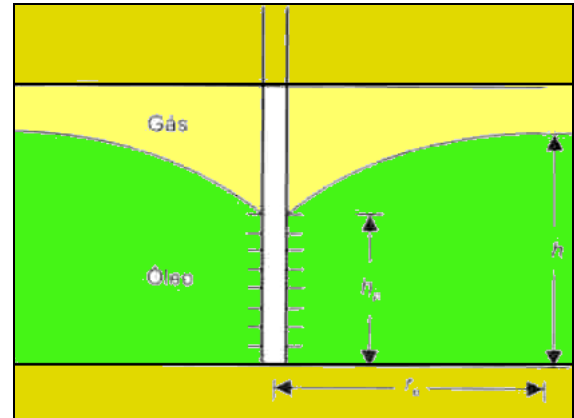


Figura 15 - Cone de gás em um reservatório de óleo com capa de gás.

4.2.13 Dano por Migração de Finos

Durante a produção de um reservatório, os fluidos produzidos viajam pelos poros da formação de regiões distantes até o poço. Esses fluidos, também entram e transportam consigo finas partículas através dos poros, algumas dessas partículas podem ser *trapeadas* nos espaços porosos e causarem danos. Possivelmente, tal dano por migração de finos não pode ser resolvido, mas pode ser aumentado pelo uso da UBD. Então, campos com migração de finos é uma preocupação constante e eles serão improváveis candidatos à utilização dessa tecnologia. (BENNION, 2000)

Formações produtoras de areia exibem tal comportamento. Desnecessário dizer que a produção de areia é também um problema durante a produção, na escolha do mecanismo de produção e na escolha dos projetos de controle e de mecanismos de limpeza para eliminar ou reduzir os danos por migração de finos.

A seguir, nas figuras 16 e 17 esquema representativo da migração de finos na formação e foto ampliada dos finos na formação.

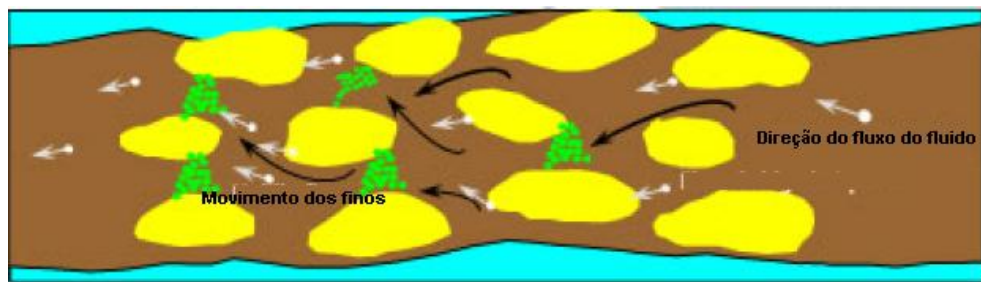


Figura 16 – Migração de finos na formação.

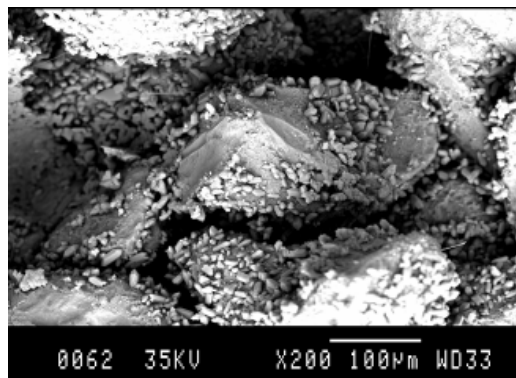


Figura 17 - Finos na formação.

4.2.14 Vitrificação

Vitrificação, esmagamento ou polimento do poço, pode ser um problema em algumas operações de completação de poço aberto, principalmente em reservatórios de *tight* gás, particularmente se o gás puro é usado como fluido de perfuração. (BENNION, 199-)

Devido à pequena capacidade de transferência de calor do gás, se nenhum fluido de circulação estiver presente como meio de perfuração, temperaturas extremamente altas entre a rocha e a broca podem ser geradas. Isso pode resultar, quando combinado com a água conata e poeira da rocha gerada no processo de perfuração em conjunto com altas temperaturas e a ação de polimento da broca, na formação de uma fina e pouco permeável camada semelhante a uma cerâmica que

vitrifica a face da formação. Esse fenômeno pode ser observado nos testemunhos de perfuração. Semelhante à invasão de sólidos da lama, a vitrificação tende a ser especificamente problemática em cenários de completação de poços abertos. (BENNION, 199-)

O esmagamento causado por uma centralização e uma movimentação da coluna, danos mecânicos causados por centralizadores, colares, etc, contra a face da formação resultam na intrusão de uma pasta formada por finos e sólidos perfurados na face da formação diretamente adjacente ao poço. Mais uma vez, a localização do dano é usualmente problemática quando da completação de poços abertos. (BENNION, 199-)

Quando a UBD é utilizada com sucesso, ele pode trazer grandes benefícios como a descoberta de zonas de produção não previstas, aumento da ROP, eliminação da perda de circulação e prisão diferencial, produção antecipada e reduzir o dano à formação. Como resultado desses benefícios e esperado um aumento na recuperação final do poço e consequentemente um VPL melhor do projeto. Contudo a UBD pode falhar porque reservatórios inadequados são perfurados gerando prejuízos e até mesmo a perda do poço. Por essas razões a escolha de um poço candidato deve ser feita com muito critério levando em conta todas as razões expostas nesse capítulo.

5 TOMADA DE DECISÃO

A palavra decisão é formada por *de* (que em latim significa para, extrair, interromper) que se antepõe à palavra *caedere* (que significa cindir, cortar). Tomada ao pé da letra, a palavra decisão significa “parar de cortar” ou “deixar fluir”. (GOMES et al., 2002)

Uma decisão precisa ser tomada sempre que estamos diante de um problema que possui mais de uma alternativa para sua solução. Mesmo quando, para solucionar um problema, possuímos uma única ação a tomar, temos as alternativas de tomar ou não essa ação. Concentrar-se no problema certo possibilita direcionar todo o processo. (GOMES et al., 2002)

A teoria da decisão não é uma teoria descritiva ou explicativa, já que não faz parte de seus objetivos descrever ou explicar como e/ou porque as pessoas (ou instituições) agem de determinada forma ou tomam certas decisões. Pelo contrário, trata-se de uma teoria ora prescritiva, ora normativa, no sentido de pretender ajudar as pessoas a tomarem decisões melhores, em face de suas preferências básicas. A teoria da decisão parte do pressuposto de que os indivíduos são capazes de expressar suas preferências básicas, e são racionais, quando enfrentam situações de decisão simples. Com base nessa proposição, a metodologia desenvolvida pela teoria da decisão permite a resolução de problemas mais complexos. Deve ser salientado que o ser humano tem uma capacidade cognitiva limitada; assim, tem limitação para compreender todos os sistemas ao seu redor e/ou processar todas as informações que recebe. (GOMES et al., 2002)

Segundo GOMES et al. (2002) são três as fontes de restrição cognitiva:

a) capacidade limitada do processamento do cérebro humano;

- b) desconhecimento de todas as alternativas possíveis de resolver o problema;
- c) influência dos aspectos emocionais e afetivos.

Podemos definir teoria da decisão como: conjunto de procedimentos e métodos de análise que procuram assegurar a coerência, a eficácia e a eficiência das decisões tomadas em função das informações disponíveis, antevendo cenários possíveis. Para tal, essa teoria pode usar ferramentas matemáticas ou não. A teoria da decisão é uma teoria que trata de escolhas entre alternativas. (GOMES et al., 2002)

Nenhuma decisão é fácil de ser tomada, ainda mais se essa decisão envolver critérios muito complexos e grandes quantias em dinheiro, como no caso da utilização da UBD. Para facilitar essa decisão é necessária a utilização de métodos específicos, como os de Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios (MCDA) que são aplicados em situações nas quais se necessita da análise de múltiplos critérios ou de múltiplos atributos. (SALOMON, 2004)

Os métodos MCDA têm sido desenvolvidos para apoiar e conduzir os decisores na avaliação e na escolha das alternativas-solução, em diferentes espaços. O espaço das variáveis de decisão, em particular, consiste no conjunto de decisões factíveis e não-factíveis para um dado problema. (GOMES et al., 2002)

Nas decisões em grupo, as preferências individuais podem ser combinadas de modo a resultar em uma decisão do grupo. As variáveis de decisão são as ações detalhadas que devem ser decididas e comunicadas. A decisão do grupo é, assim, consequência de um intercâmbio de decisões entre os membros do grupo do qual emana a negociação das propostas aceitáveis. Se o compromisso é obtido, elas são automaticamente acordadas. (GOMES et al., 2002)

Um ponto importante da decisão é a objetividade: os participantes podem divergir na avaliação de uma decisão, mas a decisão grupal é objetiva e final, como

decisão. Pesos podem então ser usados para agregar os valores das funções-objetivos em um único valor, determinando a utilidade da decisão alternativa. (GOMES et al., 2002)

De acordo com Saaty (1991), um modelo de tomada de decisão multicriterial para traduzir eficientemente um sistema e conduzir à escolha da melhor alternativa deve ser de simples construção; adaptável tanto aos grupos quanto aos indivíduos; natural à intuição e ao pensamento geral; encorajar a formação de compromisso e do consenso e não exigir uma especialização excessiva para comunicar e administrar. (apud, SALOMON, 2004)

A análise de decisão trata-se de uma teoria prescritiva, pois busca ajudar as pessoas e instituições a tomarem decisões melhores em casos complexos que envolvem diversas variáveis. Ela parte do pressuposto de que os indivíduos podem expressar suas preferências em casos simples, porém, em casos complexos, são incapazes de manipular intuitivamente suas preferências. Neste contexto, a metodologia para análise de decisão, quando for aplicada para resolução de um problema complexo, demandará a decomposição do problema e a resolução por partes para que, no final, as partes sejam consideradas e se obtenha um resultado final. (SALOMON, 2004)

De acordo com Saaty (1991), para ser realista, os métodos MCDA têm de incluir e medir todos os fatores importantes, qualitativa e quantitativamente mensuráveis, sejam eles tangíveis ou intangíveis. É o que se propõe em uma aplicação MCDA, considerando-se, também, as diferenças e os conflitos de opiniões como nos casos da vida real. (apud SALOMON, 2004)

O apoio à decisão por múltiplos critérios não busca, portanto, uma solução ótima para determinado problema, como acontece na Pesquisa Operacional tradicional, mas uma solução de compromisso, em que deve prevalecer o consenso entre as partes envolvidas. Segundo esse enfoque, os critérios estabelecidos, bem como a importância a eles atribuída, tem papel fundamental nos resultados obtidos.

Esse tipo de análise permite tratar o processo decisório de forma mais transparente, aumentando sua credibilidade. Há que se notar porém, que a abordagem do problema de decisão, pela óptica do apoio à decisão por múltiplos critérios, não pretende apresentar ao agente de decisão uma solução definitiva para seu problema, elegendo uma única verdade representada pela alternativa selecionada. Essa abordagem visa, sim, apoiar o processo decisório com a recomendação de ações que estejam em sintonia com as preferências expressas pelo agente de decisão. (GOMES et al., 2002)

Na tomada de decisão para a perfuração de um poço de petróleo, utilizando ou não a tecnologia UBD, vários fatores ou critérios devem ser considerados, que vão desde análise de históricos dos poços da região avaliada, necessidade de antecipação da produção, previsão de problemas de perfuração, entre outros. A técnica para seleção de poços envolve uma tomada de decisão relacionada a diversos fatores, por este motivo, propõe-se a utilização de um método MCDA.

Na tabela 4, a seguir, é possível constatar a utilização dos métodos MCDA apresentados em artigos nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção no Brasil, nos últimos oito anos. Observa-se que s foram publicados mais de 100 artigos sobre o MCDA. (apud SALOMON, 2004)

Foco da Pesquisa	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Total
AHP	5	1	1	3	4	2	3	2	21
ELECTRE	1	2	3	1	1	4	2	8	22
MACBETH	10	1	1	2	0	4	4	1	23
Outros Métodos	7	1	1	0	0	0	3	2	14
Metodologia	2	4	7	3	1	2	0	4	23
Total	25	9	13	9	6	12	12	17	103

Tabela 4 – Quantidade de artigos técnicos utilizando métodos MCDA em pesquisas de Eng. de Produção.

Observa-se, ainda, na tabela 4, que no Brasil as pesquisas se concentram, basicamente, em aplicações dos métodos AHP (*Analytic Hierarchyc Process*), ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) ou MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*). (apud SALOMON, 2004).

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), processo desenvolvido há mais de 20 anos pelo então professor Dr. Thomas Saaty e divulgado a partir da publicação de seu livro na década de 70 (SAATY, 1980). (SALOMON, 2004). Nele a estruturação do problema começa na definição de um objetivo global. A seguir definem-se os sub-objetivos numa estrutura de árvore, tendo como raiz o objetivo global. Conforme se afastam da raiz os fatores se tornam mais específicos. As extremidades, as folhas da árvore, representam os critérios ou objetivos. (JANSEN, 2004)

O método ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*), desenvolvido a partir de Roy (1968), trata-se de um algoritmo que reduz o tamanho do conjunto de alternativas possíveis por sua classificação de acordo com o critério da dominância de uma alternativa sobre outra. (JANSEN, 2004)

O método MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), apresentado em Bana e Costa & Vansnick (1994), critica o uso de funções com valor cardinal. Ele fornece um indicador de inconsistência do conjunto de critérios formulados, o que facilita sua revisão por Programação Linear. (JANSEN, 2004)

Da classificação de Vincke (1992), o AHP se trata de um método da Escola Americana; os métodos da família ELECTRE pertencem à Escola Européia de MCDA; já o MACBETH possui elementos de ambas escolas, como, por exemplo, agregação (Escola Americana) e subordinação (Escola Européia). (apud SALOMON, 2004)

Segundo Salomon (2004), considerando-se os passos para a aplicação dos métodos anteriores e os conceitos de atributos do desempenho, algumas observações sobre o desempenho das aplicações do MCDA podem ser apresentadas:

- As aplicações do ELECTRE requerem menor quantidade de dados que as aplicações do AHP, que por sua vez, requerem menos dados que as do MACBETH. Teoricamente, mais dados necessários consomem mais recursos, como, por exemplo, especialistas que provêm os julgamentos.
- Nas aplicações do AHP e do MACBETH verifica-se a coerência dos julgamentos. No método ELECTRE a verificação de coerência não é aplicável, e ela constitui-se numa investigação da Qualidade dos Dados.
- Para a aplicação do AHP e do ELECTRE não se necessita de “software proprietário”, o que, no entanto, se trata de uma exigência para a aplicação do método MACBETH.

Segundo o estudo apresentado em SALOMON (2004) observa-se que a aplicação do AHP apresenta um desempenho superior aos dos outros métodos nos atributos que foram considerados. Nesse método espera-se a obtenção de bons resultados desde que o problema satisfaça três pré-requisitos:

- Disposição de tempo para a tomada de decisão;
- Não exista mais do que nove alternativas;
- Haja independência entre os elementos envolvidos de um mesmo nível hierárquico.

Então, baseando-se nesse estudo e na análise dos critérios básicos para seleção do método o AHP foi escolhido para ser aplicado ao problema proposto.

5.1 Método AHP (Analytic Hierarchy Process)

O método AHP foi criado por Saaty no período em que trabalhava no Departamento de Defesa Americano na área de planejamento. As primeiras aplicações surgiram em 1973, em estudos relacionados à rede de transportes do Sudão. Entre 1974 e 1978 houve um grande enriquecimento teórico do método. (SALOMON, 2004)

O método de Saaty pode ser usado na quantificação das características qualitativas, permitindo a ponderação de todas as características e a priorização dos direcionadores. Sua teoria reflete o que parece ser um método natural de funcionamento da mente humana. Ao defrontar-se com um grande número de elementos, controláveis ou não, que abrangem uma situação complexa, ela os agrega em grupos, segundo propriedades comuns. A questão central do método é identificar com que peso os fatores individuais do nível mais baixo de uma hierarquia influenciam seu fator máximo, ou seja, o objetivo geral. (SALOMON, 2004)

5.2 Aplicação do Método AHP

A seguir serão apresentados os passos necessários para a aplicação desse método.

5.2.1 Passo 1 - Estruturação

Geralmente no MCDA, adota-se o uso de estruturas hierárquicas, também denominadas de estruturas arborescentes para se representar o modelo de MCDA. Nas estruturas hierárquicas, o objetivo da decisão é colocado no primeiro nível

hierárquico, no segundo nível estão os critérios e, no terceiro estão colocadas as alternativas. Um nível hierárquico intermediário poderia ser inserido entre o segundo nível (critérios) e o terceiro (alternativas) que seriam os subcritérios, conforme figura 18. (SALOMON, 2004),

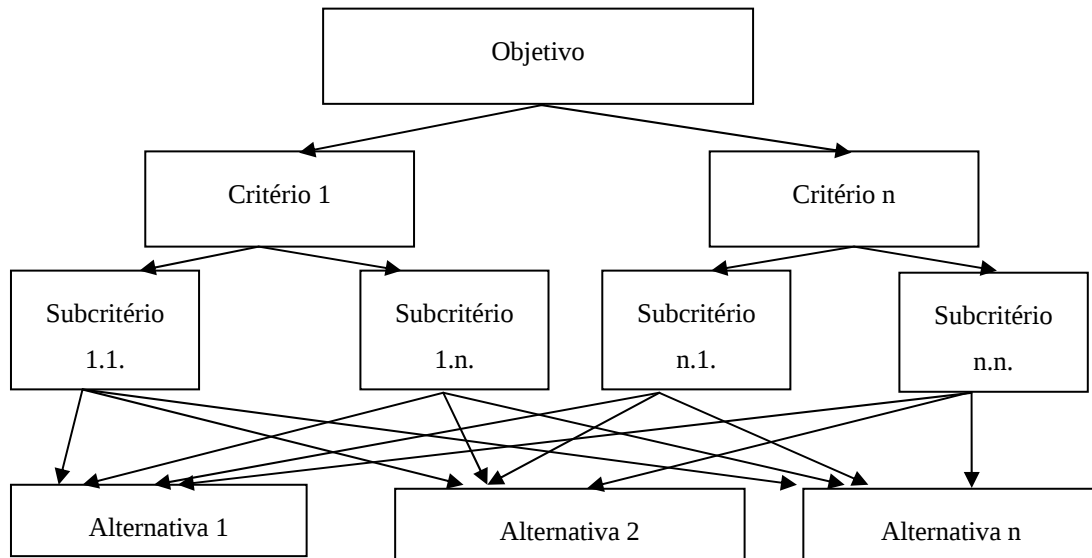


Figura 18 - Estrutura hierárquica do AHP

5.2.2 Passo 2 - Atribuição de Pesos para Critérios e Alternativas

Uma vez que o MCDA já esteja estruturado, isto é, que já se definiram quais são os critérios e as alternativas, o passo seguinte é a atribuição dos pesos, ou dos valores de importância para os critérios e dos valores de desempenho para as alternativas de acordo com cada critério.

No método AHP são utilizadas matrizes de julgamentos para se obter os valores de desempenho das alternativas com relação a cada critério e também para se obter valores de importância desses critérios. Nele os julgamentos obedecem à Escala Fundamental (Saaty, 1980), apresentada nas figuras 19 e 20. (SALOMON, 2004)

Escala de Comparação de Critérios (adaptado de Saaty, 1980)

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os critérios contribuem de forma idêntica para o objetivo.
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que o outro.
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que o outro.
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo.
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo.
2,4,6 e 8 (recíprocos aos anteriores)	Valores intermediários	Também podem ser utilizados

Figura 19 - Escala de comparação de critérios.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema- mente	Bastante	Muito	Pouco	Igual	Pouco	Muito	Bastante	Extrema- mente
MENOS IMPORTANTE					MAIS IMPORTANTE			

Figura 20 - Escala de comparação de critérios.

A tabela 5 apresenta uma matriz de julgamentos da importância relativa dos critérios. Ou seja, os julgamentos são realizados entre os critérios, ou subcritérios. O critério C1 foi julgado como sendo “pouco menos importante” que o critério C2 e “pouco mais importante” que o critério C3.

No método AHP, os valores de importância dos atributos são obtidos com o autovetor, w , da matriz de julgamentos A , conforme a equação 8, onde λ é o autovalor máximo. (SALOMON, 2004)

$$A w = \lambda w \quad (8)$$

Equação 8 - Autovetor da matriz de critérios.

Critério	C1	C2	C3	C1	C2	C3	Importância
C1	1	1/3	3	$a_{11}/\Sigma a_{n1}$ $1 / 4,33=0,23$	$a_{12}/\Sigma a_{n2}$ $0,33/1,53=0,22$	$a_{13}/\Sigma a_{n3}$ $0,33/9,0=0,33$	$25,8\% =$ $(0,23+0,22+0,33)/3$
C2	$1/a_{12}$ $=3$	1	5	$a_{21}/\Sigma a_{n1}$ $3 / 4,33=0,69$	$a_{22}/\Sigma a_{n2}$ $1/1,53=0,65$	$a_{23}/\Sigma a_{n3}$ $0,56/9,0=0,56$	$63,7\% =$ $(0,69+0,65+0,65)/3$
C3	$1/a_{13}$ $=1/3$	$1/a_{23}$ $=1/5$	1	$a_{31}/\Sigma a_{n1}$ $0,33/4,33=0,08$	$a_{32}/\Sigma a_{n2}$ $0,20/1,53=0,13$	$a_{33}/\Sigma a_{n3}$ $0,11/9,0=0,11$	$10,5\% =$ $(0,08+0,13+0,11)/3$
Σ	4,33	1,53	9,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 5 – Matriz de julgamento de critérios.

Quando uma matriz de julgamentos apresenta todos os julgamentos coerentes entre si, tem-se $\lambda = n$, onde n é a ordem da matriz de julgamentos. Para os julgamentos apresentados na tabela 5 tem-se $\lambda = 3,040$. Como $\lambda > n$ esses julgamentos não são 100% coerentes entre si.

$$\lambda = [4,33;1,53;9,00] \times \begin{bmatrix} 0,258 \\ 0,637 \\ 0,105 \end{bmatrix} = 4,33 \times 0,25 + 1,53 \times 0,637 + 9 \times 0,105 = 3,055 \quad (9)$$

Equação 9 – Cálculo de λ

Na aplicação do método AHP, pode se verificar a coerência dos julgamentos, o CR (Consistency Ratio – Razão de Coerência). O cálculo da CR é obtido pela equação 10, onde além do afastamento entre λ e n utiliza-se, também, um “erro aleatório” (Saaty, 2001) associado à ordem da matriz de julgamentos: o RI.

$$CR = \frac{\lambda - n}{(n-1)RI} \quad (10)$$

Equação 10 - Equação para cálculo de razão de coerência.

Onde:

CR - Razão de coerência;

λ – autovalor máximo;

n = ordem da matriz;

RI – Índice randômico.

O RI (Índice de Consistência Randômica), foi derivado a partir de uma amostra de 500 matrizes recíprocas geradas de forma randômica e que apresenta as mesmas dimensões de A. O índice de consistência randômico, RI, utiliza uma escala de 9 pontos mais os valores recíprocos 1/9, 1/8, ..., 1, conforme tabela 6, e é dado pelo tamanho da matriz (ou o número de fatores, n, na matriz de comparação) (SALOMON, 2004).

Na tabela 6 pode-se observar que para as matrizes de ordem 1 e 2 não se deve utilizar o índice de coerência para ajuste da razão de coerência.

n	RI	n	RI	n	RI
1	0,00	6	1,24	11	1,51
2	0,00	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,90	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

Tabela 6 - Índice de aleatoriedade.

Saaty (2001) recomenda que, para valores de CR acima de 0,20, os julgamentos sejam revistos. Contudo, Saaty (1993 apud GOMES et al., 2003) nota

que a incoerência entre os julgamentos deve servir mais como um alerta do que um fato necessariamente não desejável. De acordo com Saaty (2001), a revisão dos julgamentos é um procedimento sistemático para a melhoria do Auxílio à Decisão.

Aplicando os valores de λ , n e RI na equação 10 temos:

$$CR = \frac{3,055 - 3}{(3 - 1)0,58} = 0,048 \quad (11)$$

Equação 11 – Cálculo de CR para a tabela 5.

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam matrizes de julgamentos do desempenho das alternativas com relação aos critérios C1, C2 e C3, respectivamente. Nos julgamentos foi utilizada a Escala Fundamental (figuras 19 e 20). Os valores de CR obtidos para as matrizes de julgamentos dos critérios C1 e C2 são, aproximadamente, iguais a 0,062 e 0,028. Assim, os vetores apresentados podem ser adotados como vetores do desempenho das alternativas nestes dois atributos. (adaptado SALOMON, 2004)

Alternativa	A1	A2	A3	Desempenho
A1	1	1/7	1/5	7,2%
A2		1	3	64,9%
A3			1	27,9%

Tabela 7 - Desempenho das alternativas com relação ao critério C1.

Alternativa	A1	A2	A3	Desempenho
A1	1	1/5	3	17,8%
A2		1	9	75,2%
A3			1	7,0%

Tabela 8 - Desempenho das alternativas com relação ao critério C2.

Com relação ao critério C3, trata-se de um atributo quantitativo e inverso. A tabela 9 apresenta uma maneira de se obter valores do desempenho das

alternativas para um atributo inverso, com a harmonização dos dados disponíveis para o desempenho. (adaptado SALOMON, 2004)

Alternativa	C3 (\$)	Desempenho	
A1	15.000	$52/15 = 3,47$	$3,47 / 9,13 = 38,0\%$
A2	20.000	$52/20 = 2,60$	$2,60 / 9,13 = 28,5\%$
A3	17.000	$52/17 = 3,06$	$3,06 / 9,13 = 33,5\%$
Soma	52.000	9,13	100%

Tabela 9 - Desempenho das alternativas com relação ao critério C3.

A matriz de decisão obtida com a aplicação do método AHP está apresentada na Tabela 10. (adaptado SALOMON, 2004)

Alternativa	C1	C2	C3
A1	7,2%	17,8%	38,0%
A2	64,9%	75,2%	28,5%
A3	27,9%	7,0%	33,5%

Tabela 10 - Matriz de decisão

5.2.3 Passo 3 - Síntese dos Resultados

Nos itens anteriores foi apresentada a maneira de se obter os valores de importância relativa dos critérios e dos valores de desempenho das alternativas. Para se estabelecer pesos ou valores de desempenho no método AHP utilizou-se para isso matrizes de julgamentos. (SALOMON, 2004)

Neste item apresenta-se como o método AHP trabalha os componentes da matriz de decisão a fim de prover o Auxílio à Decisão. Este passo é denominado

Síntese dos Resultados. No método AHP, o vetor de Desempenho Global é obtido multiplicando-se a matriz de decisão (tabela 10) pelo vetor de importância relativa dos critérios (tabela 5), nesta ordem. O resultado está apresentado na Tabela 11.

Alternativa	Desempenho Global
A1	16,3%
A2	56,6%
A3	27,1%

Tabela 11 – Tabela de desempenho global das alternativas

Na tomada de decisão para a utilizando ou não a tecnologia UBD, propõe-se a utilização do método AHP, por espera-se a obtenção de bons resultados, pois a tomada de decisão sobre a utilização da tecnologia deve ser feita de forma criterioso, não apresentará mais do que nove alternativas e os critérios utilizados independentes.

6 MODELO PROPOSTO PARA A TÉCNICA DE SELEÇÃO DE POÇOS

O primeiro passo crítico, na construção de um projeto UBD, é o exame de um candidato para utilização dessa tecnologia; esse é um processo rigoroso e deliberado, no qual a possibilidade de um campo ou poço ser candidato à utilização da UBD é avaliado tanto técnica como economicamente.

A técnica de seleção de poços, também referenciada no inglês pelo termo screening, é o primeiro passo na seleção do poço; nela será analisado o potencial e determinado se o poço tem atributos que o tornem, ou não, um bom candidato para a UBD. Um exame, seleção e planejamento preliminares mal realizados, podem gerar um excessivo entusiasmo desviando o foco da tecnologia.

Segundo BLADE, 2004, conceitualmente, o exame do candidato é uma reunião de dados e processos de avaliação técnica que respondam às seguintes questões:

- Existem relatos de perfuração que foram, ou não, desenvolvidos com o uso de UBD neste poço ou campo?
- Causas de danos à formação em perfuração convencional podem ser reduzidas ou eliminadas com o uso de UBD neste poço ou campo?
- Existe algum relato de prováveis problemas na formação ou reservatório pelo uso de UBD? Problemas de estabilidade do poço; alta pressão em conjunto com alta permeabilidade e formações suscetíveis à embebição espontânea?
- Sob um aspecto prático podem ser realizadas operações em condições UB? Apto para realizar um drawdown desejado; apto para realizar limpeza desejada do poço; disponibilidade de motor e BHA; apto para controlar a BHP enquanto perfura; disponibilidade de bombas,

compressores, *diverter* rotativo, equipamentos de superfície, equipamentos para manuseio de sólidos, etc?

- Um sistema apropriado de fluidos pode ser projetado? Compatibilidade entre o fluido e a formação; compatibilidade entre o fluido e o sistema de superfície; compatibilidade entre o espumante e o desespumante?
- Alguma consideração especial sobre o levantamento de obstáculos? Alta temperatura; ambiente corrosivo; segurança e considerações reguladoras; logística e disponibilidade de equipamentos?

6.1 Aplicando a Técnica AHP

Conforme apresentado anteriormente, no método AHP os pesos dos critérios e os valores de desempenhos das alternativas são obtidos com a utilização de matrizes de julgamentos. Através das considerações anteriores sobre os critérios para utilização da tecnologia, obtidas da literatura, chegamos a quatro grupos de critérios: “C1 - Informações Operacionais”, “C2 - Dano à formação”, “C3 - Problemas de Perfuração Convencional” e “C4 - Problemas de Perfuração UB”, cada um desses grupos possui um conjunto de subcritérios, conforme apresentado nas figuras 21, 22, 23, 24 e 25.

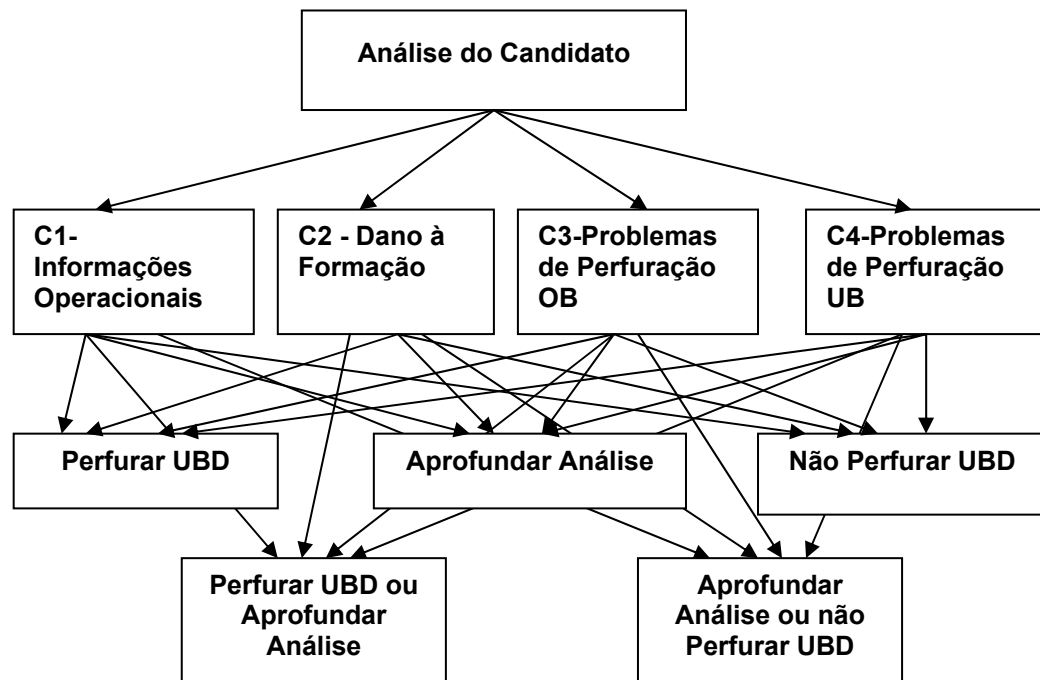


Figura 21 - Estrutura hierárquica da análise de poço candidato.

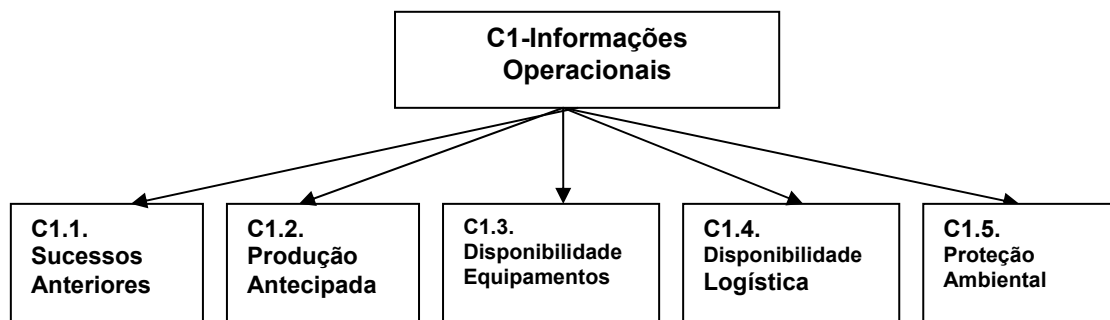


Figura 22 – Subcritérios do critério C1 – Informações Operacionais

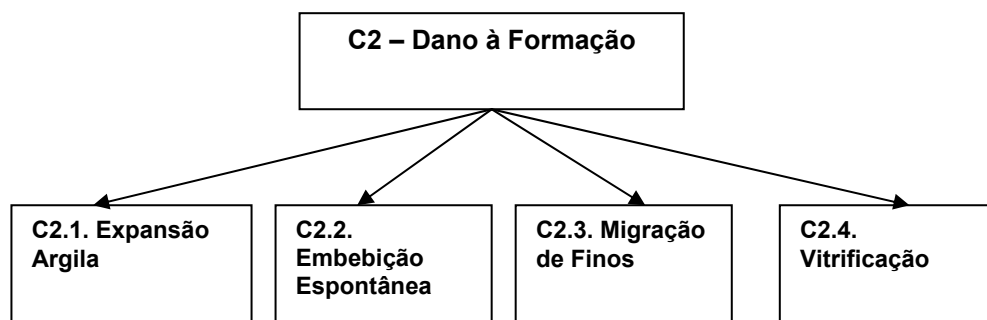


Figura 23 - Subcritérios do critério C2 – Dano à Formação

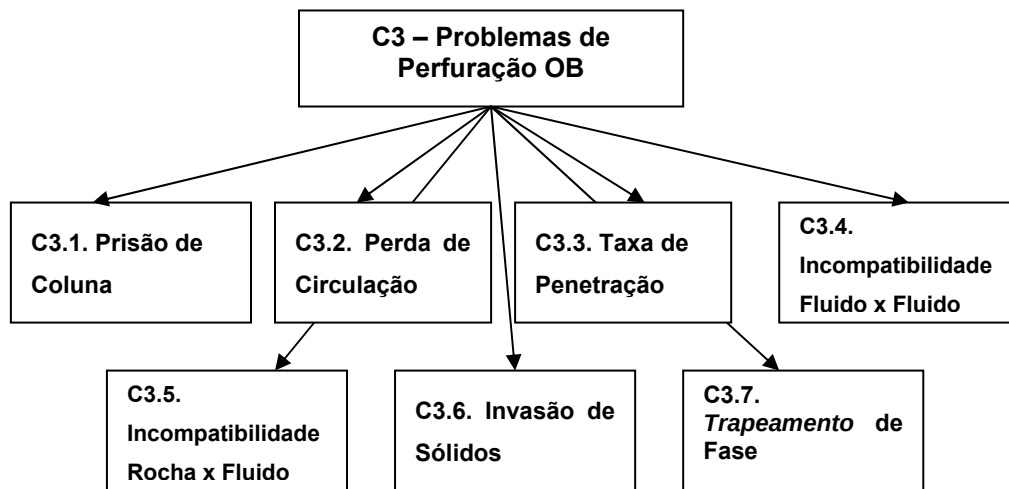


Figura 24 - Subcritérios do critério C3 – Problemas de Perfuração Convencional

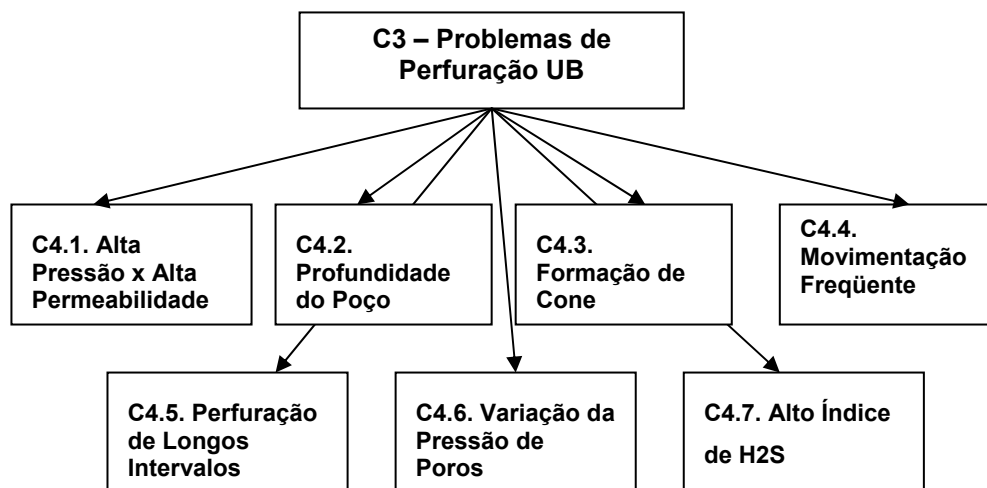


Figura 25 - Subcritérios do critério C4 – Problemas de Perfuração UB

O método aplicado nesse trabalho é o de comparação par a par no contexto do processo AHP. Essa técnica baseia-se numa matriz quadrada $n \times n$, onde as linhas e colunas correspondem aos “n” critérios analisados para o problema em questão. O estabelecimento de comparações par a par para todos os critérios foi realizado baseado nas tabelas das figuras 19 e 20.

A tabela 12 apresenta a relevância dos critérios, apresentados no nível 1, adotados pela autora, com os cálculos do percentual de importância e a razão de coerência entre os critérios.

Matriz de Definição de Critérios (Nível 1)

Critérios	C1	C2	C3	C4	Importância
C1 - Informações Operacionais	1	1	1/3	1	18,33%
C2 - Dano à Formação	1	1	1	3	31,67%
C3 - Problemas de Perfuração OB	3	1	1	1	31,67%
C4 - Problemas de Perfuração UB	1	1/3	1	1	18,33%
	6,00	3,33	3,33	6,00	100,00%

$$n = 4 \quad RI = 0,90$$

$$\lambda = 4,31 \quad CR = 0,12$$

Tabela 12 – Matriz de relevância dos critérios

A tabela 13 apresenta a relevância das alternativas para o critério “C1 - Informações Operacionais”, adotados pela autora, com os cálculos do percentual de importância e a razão de coerência entre as alternativas.

C1 - Informações Operacionais

Alternativa	A1	A2	A3	A4	A5	Importância
A1 - Perfurar UB	1	3	5	5	7	49,1%
A2 - Perfurar UB ou Aprofundar Análise	1/3	1	2	3	5	21,8%
A3 - Aprofundar Análise	1/5	1/2	1	3	5	16,1%
A4 - Aprofundar Análise ou não Perfurar UB	1/5	1/3	1/3	1	3	8,7%
A5 - Não Perfurar UB	1/7	1/5	1/5	1/3	1	4,3%
	1,88	5,03	8,53	12,33	21,00	100%

$$n = 5 \quad RI = 1,12$$

$$\lambda = 5,367 \quad CR = 0,082$$

Tabela 13 - Relevância das alternativas para o critério C1.

A tabela 14 apresenta a relevância das alternativas para o critério “C2 – Dano à Formação”, adotados pela autora, com os cálculos do percentual de importância e a razão de coerência entre as alternativas.

C2 - Dano à Formação

Alternativa	A1	A2	A3	A4	A5	Importância
A1 - Perfurar UB	1	1/3	1/5	1/7	1/9	3,5%
A2 - Perfurar UB ou Aprofundar Análise	3	1	1/3	1/5	1/7	6,8%
A3 - Aprofundar Análise	5	3	1	1/3	1/5	13,4%
A4 - Aprofundar Análise ou não Perfurar UB	7	5	3	1	1/3	26,0%
A5 - Não Perfurar UB	9	7	5	3	1	50,3%
	25,00	16,33	9,53	4,68	1,79	100%
	n = 5		RI = 1,12			
	$\lambda = 5,374$		CR = 0,083			

Tabela 14 - Relevância das alternativas para o critério C2.

A tabela 15 apresenta a relevância das alternativas para o critério “C3 – Problemas de Perfuração OB”, adotados pela autora, com os cálculos do percentual de importância e a razão de coerência entre as alternativas.

C3 - Problemas de Perfuração OB

Alternativa	A1	A2	A3	A4	A5	Importância
A1 - Perfurar UB	1	5	7	8	9	57,1%
A2 - Perfurar UB ou Aprofundar Análise	1/5	1	3	5	7	22,8%
A3 - Aprofundar Análise	1/7	1/3	1	2	3	9,6%
A4 - Aprofundar Análise ou não Perfurar UB	1/8	1/5	1/2	1	3	6,9%
A5 - Não Perfurar UB	1/9	1/7	1/3	1/3	1	3,7%
	1,58	6,68	11,83	16,33	23,00	100%
	n = 5		RI = 1,12			
	$\lambda = 5,521$		CR = 0,116			

Tabela 15 - Relevância das alternativas para o critério C3.

A tabela 16 apresenta a relevância das alternativas para o critério “C4 – Problemas de Perfuração UB”, adotados pela autora, com os cálculos do percentual de importância e a razão de coerência entre as alternativas.

C4 - Problemas de Perfuração UB

Alternativa	A1	A2	A3	A4	A5	Importância
A1 - Perfurar UB	1	1/5	1/7	1/8	1/9	3,0%
A2 - Perfurar UB ou Aprofundar Análise	5	1	1/3	1/4	1/5	8,8%
A3 - Aprofundar Análise	7	3	1	1/3	1/4	15,6%
A4 - Aprofundar Análise ou não Perfurar UB	8	4	3	1	1/3	26,2%
A5 - Não Perfurar UB	9	5	4	3	1	46,3%
	30,00	13,20	8,48	4,71	1,89	100%
	n = 5		RI = 1,12			
	$\lambda = 5,503$		CR = 0,112			

Tabela 16 - Relevância das alternativas para o critério C4.

Na tabela 17 e no gráfico apresentado na figura 26, a seguir, vê-se a importância de cada critério para a seleção de poços candidatos a UBD.

Alternativa	C1	C2	C3	C4	Resultado
A1 - Perfurar UB	0,4907	0,0348	0,5710	0,0301	28,73%
A2 - Perfurar UB ou Aprofundar Análise	0,2184	0,0678	0,2281	0,0881	14,99%
A3 - Aprofundar Análise	0,1609	0,1344	0,0956	0,1563	13,10%
A4 - Aprofundar Análise ou não Perfurar UB	0,0872	0,2602	0,0686	0,2624	16,82%
A5 - Não Perfurar UB	0,0428	0,5028	0,0368	0,4631	26,36%
	100%	100%	100%	100%	100,00%

Tabela 17 – Importância dos Critérios na seleção de poços.

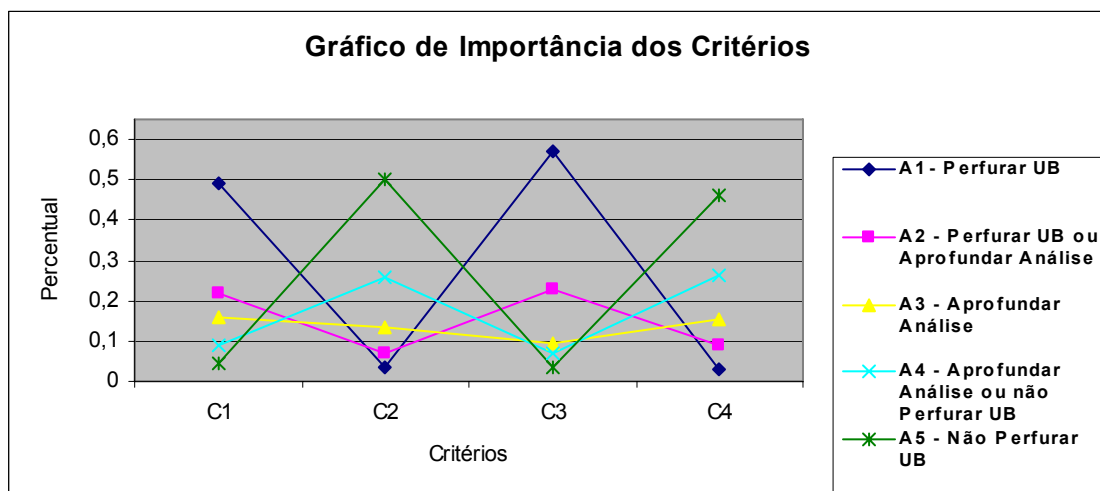


Figura 26 - Gráfico de Importância dos critérios na seleção dos poços.

As tabelas 18, 19, 20 e 21 apresentam as relevâncias dos subcritérios, apresentados no nível 2, adotados pela autora, com os cálculos do percentual de importância e a razão de coerência entre os critérios para cada um.

Matriz de Definição de Sub-Critérios - Informações Operacionais

Critérios	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	Importância	Imp. Geral
C1.1 - Sucessos Anteriores	1	5	1/3	7	3	30,35%	5,56%
C1.2 - Produção Antecipada	1/5	1	1/5	3	1/3	8,47%	1,55%
C1.3 - Disponibilidade de Equipamentos	3	5	1	3	3	40,25%	7,38%
C1.4 - Disponibilidade Logística	1/7	1/3	1/3	1	1/3	6,15%	1,13%
C1.5 - Proteção Ambiental	1/3	3	1/3	3	1	14,78%	2,71%
	4,68	14,33	2,20	17,00	7,67	100,00%	18,33%

$$\begin{aligned}
 n &= 5 \\
 \lambda &= 5,697 \\
 RI &= 1,12 \\
 CR &= 0,156
 \end{aligned}$$

Tabela 18 - Matriz de relevância do subcritério C1

Matriz de Definição de Sub-Critérios - Dano à Formação

Critérios	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	Importância	Imp. Geral
C2.1 - Expansão de Argila	1	3	3	3	46,30%	14,66%
C2.2 - Embebição Espontânea	1/3	1	1/3	1/3	9,59%	3,04%
C2.3 - Migração de Finos	1/3	3	1	3	27,25%	8,63%
C2.4 - Vitrificação	1/3	3	1/3	1	16,86%	5,34%
	2,00	10,00	4,67	7,33	100,00%	31,67%

$$\begin{aligned}
 n &= 4 \\
 \lambda &= 4,393 \\
 RI &= 1,12 \\
 CR &= 0,117
 \end{aligned}$$

Tabela 19 - Matriz de relevância do subcritério C2

Matriz de Definição de Sub-Critérios - Problemas de Perfuração OB

Critérios	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	C3.5	C3.6	C3.7	Importância	Imp. Geral
C3.1 Prisão de Coluna	1	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	4,15%	1,31%
C3.2 Perda de Circulação	5	1	3	5	5	5	3	37,61%	11,91%
C3.3 Taxa de Penetração	3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	6,87%	2,17%
C3.4 Incompatibilidade Fluido x Fluido	3	1/5	3	1	1	1/3	1/3	9,24%	2,93%
C3.5 Incompatibilidade Rocha x Fluido	3	1/5	3	1	1	1/3	1/3	9,24%	2,93%
C3.6 Invasão de Sólidos	3	0,2	3	3	3	1	1	16,06%	5,09%
C3.7 Trapeamento de Fase	3	0,3333	3	3	3	1	1	16,84%	5,33%
	21,00	2,47	16,33	13,67	13,67	8,33	6,33	100,00%	31,67%

$$n = 7$$

$$\lambda = 7,851$$

$$RI = 1,32$$

$$CR = 0,107$$

Tabela 20 - Matriz de relevância do subcritério C3**Matriz de Definição de Sub-Critérios - Problemas UBD**

Critérios	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4	C4.5	C4.6	C4.7	Importância	Imp. Geral
C4.1 Alta Pressão x Alta Permeabilidade	1	3	5	9	5	5	7	37,35%	6,85%
C4.2 Profundidade do Poço	1/3	1	5	7	5	5	7	26,48%	4,85%
C4.3 Formação de Cone	1/5	1/5	1	5	1/3	1/3	2	6,30%	1,15%
C4.4 Movimentação Frequente da Coluna	1/9	1/7	1/5	1	1/9	1/9	1/3	2,08%	0,38%
C4.5 Perfuração de Longos Intervalos	1/5	1/5	3	9	1	3	3	13,22%	2,42%
C4.6 Variação da Pressão de Poros	1/5	1/5	3	9	1/3	1	3	10,50%	1,92%
C4.7 Alto Índice de H ₂ S	1/7	1/7	1/2	3	1/3	1/3	1	4,08%	0,75%
	2,19	4,89	17,70	43,00	12,11	14,78	23,33	100,00%	18,33%

$$n = 7$$

$$\lambda = 8,224$$

$$RI = 1,32$$

$$CR = 0,155$$

Tabela 21 - Matriz de relevância do subcritério C4

O cálculo da CR de todas as tabelas anteriores foi inferior a 0,20, portanto podem ser aceitos pelo critério definido por Saaty (2001).

Após o preenchimento das matrizes, comparativas de critérios, e calculadas as prioridades relativas para os critérios nos vários níveis, esses cálculos foram realizados utilizando uma planilha eletrônica e seus resultados podem ser vistos na tabela 22, 23, 24 e 25 a seguir.

Critério	Importância Geral
C1 – Informações Operacionais	
C1.1 - Sucessos Anteriores	5,56%
C1.2 - Produção Antecipada	1,55%
C1.3 - Disponibilidade de Equipamentos	7,38%
C1.4 - Disponibilidade Logística	1,13%
C1.5 - Proteção Ambiental	2,71%

Tabela 22 - Grau de importância na avaliação do critério C1.

Critério	Importância Geral
C2 – Dano à Formação	
C2.1 - Expansão de Argila	14,66%
C2.2 - Embebição Espontânea	3,04%
C2.3 - Migração de Finos	8,63%
C2.4 – Vitrificação	5,34%

Tabela 23 - Grau de importância na avaliação do critério C2.

Critério	Importância Geral
C3 – Problemas de Perfuração OB	
C3.1 - Prisão de Coluna	1,31%
C3.2 - Perda de Circulação	11,91%
C3.3 – Taxa de Penetração	2,17%
C3.4 – Incompatibilidade Fluido x Fluido	2,93%
C3.5 – Incompatibilidade Rocha x Fluido	2,93%
C3.6 - Invasão de Sólidos	5,09%
C3.7 - Trapeamento de Fase	5,33%

Tabela 24 - Grau de importância na avaliação do critério C3.

Critério	Importância Geral
C4 – Problemas de Perfuração UB	
C4.1 - Alta Pressão x Alta Permeabilidade	6,85%
C4.2 – Profundidade do Poço	4,85%
C4.3 - Formação de Cone	1,15%
C4.4 – Movimentação Freqüente da Coluna	0,38%
C4.5 – Perfuração de Longos Intervalos	2,42%
C4.6 - Variação da Pressão de Poros	1,92%
C4.7 - Alto Índice de H ₂ S	0,75%

Tabela 25 - Grau de importância na avaliação dos critérios.

6.2 Construção da Ferramenta

Após o levantamento dos critérios e verificada a coerência entre os julgamentos da matriz, definem-se os pesos dos critérios e, então, cria-se um modelo para recomendação sobre a avaliação da utilização da UBD por um poço candidato.

A ferramenta proposta, utilizada pela técnica de seleção, será composta por critérios, pesos e as notas que serão atribuídas ao poço, conforme descrição a seguir.

O poço receberá uma avaliação, realizada por especialistas, para cada critério estabelecido. Essa avaliação é representada por meio de notas que variam de zero a 100. Para a atribuição de notas utiliza-se como base as tabela de referência do anexo 1, proposta pela autora.

O peso dos critérios seguirá a seguinte regra: os critérios C1 e C3 terão peso positivo e os critérios C2 e C4 terão peso negativo, e seus percentuais serão

iguais aos calculados anteriormente pelo método dos pares, apresentados na tabela 22, 23, 24 e 25.

A ponderação será a ferramenta utilizada para quantificar o resultado da nota avaliada de cada critério, os modelos clássicos de tomada de decisão também utilizam a ponderação para esse fim. Uma nota ponderada é o peso de um critério multiplicado pela nota que o poço recebeu neste critério. A nota final de cada poço será a somatória das notas ponderadas de todos os critérios e, irá variar de +50 a -50 pontos, conforme quadro apresentado na figura 27. Comparando-se o resultado obtido com o quadro da figura 27, obtêm-se ou uma recomendação para:

- Perfurar Underbalanced;
- Perfurar Underbalanced ou Aprofundar Análise;
- Aprofundar Análise;
- Aprofundar Análise ou não Perfurar Underbalanced;
- Não Perfurar Underbalanced.

Qualidade	Media Pondera	Recomendação
Excelente	Entre 31 e 50	Perfurar <i>Underbalanced</i>
Bom	Entre 11 e 30	Perfurar <i>Underbalanced</i> ou Aprofundar Análise
Médio	Entre -11 e 10	Aprofundar Análise
Baixo	Entre -31 e -10	Aprofundar Análise ou não Perfurar <i>Underbalanced</i>
Não candidato	Entre -50 e -30	Não Perfurar <i>Underbalanced</i>

Figura 27 - Quadro comparativo para recomendações.

Utilizando os dados e critérios anteriores, cria-se a planilha eletrônica, apresentada na figura 28, como ferramenta de apoio para ser utilizada na técnica de seleção de poços candidatos a UBD.

Planilha para Seleção de Poço Candidatos à UBD

Poço:

Item	Critério de Avaliação	Peso	Nota	MP
1	C1 - Informações Operacionais			
1.1	C1.1 - Sucessos Anteriores	5,56%	-	-
1.2	C1.2 - Produção Antecipada	1,55%	-	-
1.3	C1.3 - Disponibilidade Equipamentos	7,38%	-	-
1.4	C1.4 - Disponibilidade Logística	1,13%	-	-
1.5	C1.5 - Proteção Ambiental	2,71%	-	-
2	C2 - Dano à Formação			
2.1	C2.1 - Expansão de Argila	14,66%	-	-
2.2	C2.2 - Embebição Espontânea	3,04%	-	-
2.3	C2.3 - Migração de Finos	8,63%	-	-
2.4	C2.4 - Vitrificação	5,34%	-	-
3	C3 - Problemas de Perfuração OB			
3.1	C3.1 Prisão de Coluna	1,31%	-	-
3.2	C3.2 Perda de Circulação	11,91%	-	-
3.3	C3.3 Taxa de Penetração	2,17%	-	-
3.4	C3.4 Incompatibilidade Fluido x Fluido	2,93%	-	-
3.5	C3.5 Incompatibilidade Rocha x Fluido	2,93%	-	-
3.6	C3.6 Invasão de Sólidos	5,09%	-	-
3.7	C3.7 Trapeamento de Fase	5,33%	-	-
4	C4 - Problemas de Perfuração UB			
4.1	C4.1 Alta Pressão x Alta Permeabilidade	6,85%	-	-
4.2	C4.2 Profundidade do Poço	4,85%	-	-
4.3	C4.3 Formação de Cone	1,15%	-	-
4.4	C4.4 Movimentação Frequente	0,38%	-	-
4.5	C4.5 Perfuração de Longos Intervalos	2,42%	-	-
4.6	C4.6 Variação Pressão de Poros	1,92%	-	-
4.7	C4.7 Alto Índice de H2S	0,75%	-	-
Nota Final				-

Qualidade do poço para utilização da UBD

Media

Aprofundar Análise

Recomendação

Obs.

1 - Faixa de Notas - 0 a 100 (utilizar anexo 1 como referência)

Figura 28 - Planilha para seleção de poço candidatos a UBD.

6.3 Exemplo de Utilização da Ferramenta

Nas figuras 29 e 30 dois exemplos de preenchimento da ferramenta proposta.

Planilha para Seleção de Poço Candidatos à UBD

Poço: Exemplo 1

Item	Critério de Avaliação	Peso	Nota	MP
1	C1 - Informações Operacionais			
1.1	C1.1 - Sucessos Anteriores	5,56%	80,00	4,5
1.2	C1.2 - Produção Antecipada	1,55%	10,00	0,2
1.3	C1.3 - Disponibilidade Equipamentos	7,38%	50,00	3,7
1.4	C1.4 - Disponibilidade Lógica	1,13%	80,00	0,9
1.5	C1.5 - Proteção Ambiental	2,71%	10,00	0,3
2	C2 - Dano à Formação			
2.1	C2.1 - Expansão de Argila	14,66%	30,00	(4,4)
2.2	C2.2 - Embebição Espontânea	3,04%	-	-
2.3	C2.3 - Migração de Finos	8,63%	10,00	(0,9)
2.4	C2.4 - Vitrificação	5,34%	-	-
3	C3 - Problemas de Perfuração OB			
3.1	C3.1 Prisão de Coluna	1,31%	30,00	0,4
3.2	C3.2 Perda de Circulação	11,91%	10,00	1,2
3.3	C3.3 Taxa de Penetração	2,17%	10,00	0,2
3.4	C3.4 Incompatibilidade Fluido x Fluido	2,93%	-	-
3.5	C3.5 Incompatibilidade Rocha x Fluido	2,93%	20,00	0,6
3.6	C3.6 Invasão de Sólidos	5,09%	-	-
3.7	C3.7 Trapeamento de Fase	5,33%	-	-
4	C4 - Problemas de Perfuração UB			
4.1	C4.1 Alta Pressão x Alta Permeabilidade	6,85%	-	-
4.2	C4.2 Profundidade do Poço	4,85%	70,00	(3,4)
4.3	C4.3 Formação de Cone	1,15%	-	-
4.4	C4.4 Movimentação Frequente	0,38%	20,00	(0,1)
4.5	C4.5 Perfuração de Longos Intervalos	2,42%	-	-
4.6	C4.6 Variação Pressão de Poros	1,92%	30,00	(0,6)
4.7	C4.7 Alto Índice de H ₂ S	0,75%	10,00	(0,1)
Nota Final				2,0

Qualidade do poço para utilização da UBD

Media

Aprofundar Análise

Recomendação

Obs.

1 - Faixa de Notas - 0 a 100 (utilizar anexo 1 como referência)

Figura 29 – Preenchimento da planilha de avaliação de poço – exemplo 1.

Planilha para Seleção de Poço Candidatos à UBD

Poço: Exemplo 2

Item	Critério de Avaliação	Peso	Nota	MP
1	C1 - Informações Operacionais			
1.1	C1.1 - Sucessos Anteriores	5,56%	90,00	5,0
1.2	C1.2 - Produção Antecipada	1,55%	30,00	0,5
1.3	C1.3 - Disponibilidade Equipamentos	7,38%	50,00	3,7
1.4	C1.4 - Disponibilidade Lógica	1,13%	80,00	0,9
1.5	C1.5 - Proteção Ambiental	2,71%	70,00	1,9
2	C2 - Dano à Formação			
2.1	C2.1 - Expansão de Argila	14,66%	20,00	(2,9)
2.2	C2.2 - Embebição Espontânea	3,04%	-	-
2.3	C2.3 - Migração de Finos	8,63%	10,00	(0,9)
2.4	C2.4 - Vitrificação	5,34%	-	-
3	C3 - Problemas de Perfuração OB			
3.1	C3.1 Prisão de Coluna	1,31%	50,00	0,7
3.2	C3.2 Perda de Circulação	11,91%	60,00	7,1
3.3	C3.3 Taxa de Penetração	2,17%	70,00	1,5
3.4	C3.4 Incompatibilidade Fluido x Fluido	2,93%	10,00	0,3
3.5	C3.5 Incompatibilidade Rocha x Fluido	2,93%	50,00	1,5
3.6	C3.6 Invasão de Sólidos	5,09%	30,00	1,5
3.7	C3.7 Trapeamento de Fase	5,33%	20,00	1,1
4	C4 - Problemas de Perfuração UB			
4.1	C4.1 Alta Pressão x Alta Permeabilidade	6,85%	-	-
4.2	C4.2 Profundidade do Poço	4,85%	-	-
4.3	C4.3 Formação de Cone	1,15%	-	-
4.4	C4.4 Movimentação Frequente	0,38%	20,00	(0,1)
4.5	C4.5 Perfuração de Longos Intervalos	2,42%	-	-
4.6	C4.6 Variação Pressão de Poros	1,92%	10,00	(0,2)
4.7	C4.7 Alto Índice de H ₂ S	0,75%	-	-
Nota Final				22,0

Qualidade do poço para utilização da UBD

Media

Recomendação

**Perfurar Underbalanced ou
Aprofundar Análise**

Obs.

1 - Faixa de Notas - 0 a 100 (utilizar anexo 1 como referência)

Figura 30 - Preenchimento da planilha de avaliação de poço – exemplo 2.

Esse estudo mostra que uma ferramenta de apoio à técnica de seleção de poços a UBD não necessariamente deve ser um modelo muito complexo, pois essa é uma avaliação prévia do poço que, posteriormente, deverá ser aprofundada.

7 CONCLUSÃO

O método proposto pode ser aplicado para auxiliar o pessoal de projeto na tomada de decisão sobre utilizar ou não UBD.

O resultado da relevância dos critérios é bastante sensível à pontuação adotada, que está relacionada ao conhecimento dos especialistas julgadores.

O grande número de variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão para a aplicação da tecnologia UBD, exige a utilização de um método adequado de tomada de decisão baseado em múltiplos critérios.

O método apresentado é eficaz no tratamento das variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão sobre a utilização de UBD e apresentou bons resultados, pois satisfaz os três pré-requisitos básicos definidos por SALAMON (2004).

Uma ferramenta de apoio à técnica de seleção de poços a UBD não necessariamente deve ser um modelo muito complexo, pois essa é uma avaliação prévia do poço que, posteriormente, deverá ser aprofundada.

A aplicação da perfuração underbalance tende a crescer, pelas vantagens apresentadas para uma gama de cenários comumente encontrados na indústria do petróleo.

Para se obter uma definição mais criteriosa dessas relevâncias, recomenda-se que sejam realizados, individualmente por diversos especialistas, levantamentos sobre o critério adotado. Após esse levantamento, os dados deverão ser compilados e ajustados para se enquadrarem na escala de comparação de critérios das figuras 19 e 20. Posteriormente, estes dados deverão ser recalculados para a obtenção de uma nova tabela de pesos e esses novos dados serão lançados na ferramenta de apoio à técnica de seleção de poços.

Para validação da ferramenta e das faixas de recomendação deverão ser lançados dados de poços que já foram perfurados utilizando a tecnologia UBD e, os resultados obtidos, comparados com os resultados alcançados pela perfuração

utilizada como parâmetro e, realizados, se necessário, os ajustes para se chegar o mais próximo possível da realidade.

Depois de realizados os ajustes necessários, sugere-se a criação de um software, amigável, eficiente e capaz de incorporar novos conhecimentos baseado em inteligência artificial. Esse software será utilizado por especialistas para uma primeira avaliação do poço candidato a UBD antes de se aprofundar os estudos sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização da tecnologia no poço.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-AJMI, Saad Ebrahim. **Optimum Selection of *Underbalanced* Techniques**. 2003. 103 f. Tese (Mestre) - Curso de Petroleum Engineering, Texas A&M University, Austim, Texas.
2. ARAÚJO, E.M.P., Pastor, J.A.S.C. & Fontoura, S.A.B., 2004. **A Methodology to Enlarge Narrow Stability Windows**, Rio Oil & Gas Conference 2004. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro.
3. BENNION, D. B.; Hycal Energy Research Laboratories Ltd, ***Underbalanced Drilling Technology – Candidate Selection for Optimal Application***. 199-.
4. BENNION, D. B.; Thomas F .B.; Bietz R.F.; Hycal Energy Research Laboratories Ltd, **Low Permeability Gas Reservoirs: Problems, Opportunities and Solutions for Drilling, Completion, Stimulation and Production**. In: Gas Technology Conference, SPE35577, Calgary Alberta, Canada, May 1996.
5. BENNION, D. B.; Thomas F .B.; Bietz R.F.; Hycal Energy Research Laboratories Ltd, **Low Permeability Gas Reservoirs and Formation Damage -Tricks and Traps**. In: 2000 SPE/CERI Gas Technology Symposium, SPE59753, Calgary Alberta, Canada, April 2000.
6. BENNION, D. B.; Thomas F .B.; Bietz R.F.; Hycal Energy Research Laboratories Ltd, **Optimizing Production From low Permeability Gas Reservoirs**. In: Calgary Section of the Petroleum DSociety of CIM Technical Meeting. Calgary Alberta, Canada, December 1995.
7. BLADE ENERGY PARTNERS (Texas). **Advanced *Underbalanced* Well Design**. Frisco, 2005. Cap. 1-3.
8. BONELLI, Rosane Chagas. **Técnica ASR para Medição de Tensões In Situ em Poços de Petróleo**. 2006. 190 f. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia, Departamento de Coppe, Ufrj, Rio de Janeiro, 2006. Cap. 2. Disponível em:
<http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2006/Teses/BONELLI_RC_06_

t_M_geo.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2006.

9. DEVEREUX, Steve. **Practical Well Panning and Drilling Manual**. Tulsa - Oklahoma: Penn Well, 1988. Cap. 29, 293-310 p.
10. DUDA J. R.; MEDLEY G. H.; DESKINS, W. G. **Strong Growth Projected for Underbalanced Drilling**, Oil & Gas Journal, (September 1996), 60-77.
11. ECONOMIDES, M.J.; Watters, L.T.; Dunn-Norman, S., **Petroleum Well Construction**. Prentice Hall Petroleum Engineering Series. Prentice Hall, 1998. Cap. 15, p. 402-406.
12. FJÆR, E.; HOLT, R.M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A.M. & RISNES, R., 1992. **Petroleum Related Rock Mechanics**. Elsevier Science B. V., Amsterdam, 338 pp.
13. GOMES ET AL., L. F. A. M.; GOMES ET AL., C. F. S.; ALMEIDA, A. T., **Tomada de Decisão Gerencial: enfoque multicritério**, São Paulo: Atlas. 2002.
14. HALLIBURTON. **Underbalanced Drilling. A reservoir Focus**. (Underbalanced Applications Papers and Articles) Disponível em: < www.halliburton.com >. Acesso em: 10 mai. 2006.
15. Jansen L. K. C.; Shimizu T., Jansen J. U. **Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis**. XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção – Florianópolis. SC, Brasil, 03 a 05 de nov de 2004.
16. KIMERY Dave; MCCAFFREY Matt. **Underbalanced Drilling in Canada: Tracking the Long-Term Performance of Underbalanced Drillings Projects in Canada**: SPE/IADC 91593. In: SPE/IADC *Underbalanced Technology Conference and Exhibition 2004*. 2004 Houston Texas. p. 1 - 7.
17. LAGE, A.C.V.M. et al., 2005, Houston. Offshore Technology Conference: **“Drilling Underbalanced from Floating Unit in a 1,500-m of Water Depth Exploration Well: Planning, Equipments and Rig Modifications”**. Houston: OTC Library, 2005.
18. LIMA, H. R. de P.. **O renascimento da Tecnologia Underbalanced**. Campinas. SP. CEPETRO Online. Março, 2005, nº 16. Disponível em:

<<http://www.cepetro.unicamp.br/noticias/online/mar2005.pdf>>. Acesso em 03 mar. 2006.

19. ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, José Augusto Daniel. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. 1º ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2006. 808 p.
20. ROY, B. (1968) "Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)", *Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle*, v. 8, p. 57-75
21. ROY, B.; BOUYSSOU, D. (1993), Aide BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J.-C. (1994), "**MACBETH: an interactive path towards the construction of cardinal value functions**", *International Transactions in Operational Research*, v. 1, n. 4, p. 489-500
22. SAATY, T. L.. **Decision Making with Dependence and Feedback: the Analytic Network Process**, 2nd edition, Pittsburgh: RWS Publications. 2001.
23. SAATY, Thomas. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning Setting Priorities, Resource Allocation**, New York. McGraw-Hill. April, 1980.
24. SALOMON, V. A. P. **Desempenho da modelagem do auxílio à decisão por múltiplos critérios na análise do planejamento e controle da produção**, Tese (Doutor em Engenharia), São Paulo: Poli/USP. 2004.
25. SALOMON, V. A. P., MONTEVECHI, J. A. B. **A compilation of comparisons on the analytic hierarchy process and others multiple criteria decision making methods: some cases developed in Brazil**, *Proceedings of the Sixth International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, p. 413-420, Berna (Suíça): Bern Universität. 2001.
26. SCHUBERT Jerome J. (Us. Texas.). Texas A&M University. **Course Materials: PETE 689**. Disponível em: <<http://www.pe.tamu.edu/schubert/>>. Acesso em: 05 jun. 2006.
27. SOUZA, D. A. F., R. N. Elias, J. L. D. Alves, A. L. G. A. Coutinho, R. F. T. Lomba, A. L. Martins, **Modelagem Computacional da Prisão Diferencial da Coluna de Perfuração em Poços Não Convencionais**, 4º Seminário Brasileiro

de Simulação Computacional na Engenharia / SOFTEC - 3 de Novembro de 2003 - Rio de Janeiro.

28. THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1º Ed. Rio de Janeiro. RJ. Ed. Interciência. 2001. 271p.
29. VILLARROEL, Flavia Mara Guzmán; ARAÚJO, Ewerton Moreira Pimentel de; FONTOURA, BARRETO Sergio Augusto. **Análise Paramétrica da Estabilidade de Poços de Petróleo**. Disponível em: < www.gtep.civ.puc-rio.br/img_banco/artigos/CIL09-019.pdf >. Acesso em: 05 jun. 2006.
30. VINCKE, PHILIPPE (1992), Multicriteria Decision-Aid, New York (USA): Wiley
31. ZAMBON, Kátia Livia, CARNEIRO, Adriano Alber de França M., SILVA, Antônio Nelson Rodrigues da et al. **Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando SIG. Pesqui. Oper. [online]**. May/Aug. 2005, vol.25, no.2 [cited 28 July 2006], p.183-199. Available from World Wide Web: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382005000200002&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0101-7438.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS AUXILIARES

1. BUCKLEY, Marcia. **Dictionary of Petroleum Terms:** English - Portuguese. 1º Macaé - Brasil: Noble do Brasil S/c, 200?. p. 1-15.
2. SCHLUMBERGER - SEDCO FOREX (Us) (Ed.). **A Dictionary: for the Petroleum Industry.** 2º ed Austin - Texas, 1997. 242 p.

ANEXO 1 – REFERÊNCIA PARA PONTUAÇÃO DOS CRITÉRIOS

Critério C1 - Informações Operacionais

Sub-critério / Pontuação	00-40	40-60	60-100
C1.1 - Sucessos Anteriores	Até 40% de poços perfurados sem problemas relacionados diretamente a utilização da UBD.	Entre 40% e 60% de poços perfurados sem problemas relacionados diretamente a utilização da UBD.	Acima de 60% de poços perfurados sem problemas relacionados diretamente a utilização da UBD.
C1.2 - Produção Antecipada	Não há necessidade realizar avaliação continua da formação para poder obter dados antecipados da produção.	E desejável a obtenção obter dados antecipados da produção.	Há a necessidade realizar avaliação continua da formação para poder obter dados antecipados da produção e reconhecer possíveis zonas produtoras ainda não identificadas.
C1.3 - Disponibilidade de Equipamentos	Equipamentos não disponíveis, de difícil aquisição ou muito caro.	Equipamentos novos de fácil aquisição.	Não há necessidade de aquisição de novos equipamentos ou esse já existem na empresa.
C1.4 - Disponibilidade Logística	Existe dificuldade de acesso ao local da perfuração e os meios de transporte de pessoal, equipamentos e suprimentos e caro.	O acesso ao local da perfuração não é fácil, mas e os meios de transporte de pessoal, equipamentos e suprimentos e contínuo embora caro.	O acesso ao local da perfuração e fácil e os meios de transporte de pessoal, equipamentos e suprimentos e contínuo.
C1.5 - Proteção Ambiental	Locais de pequena ou quase nenhuma necessidade de proteção ambiental.	Locais de necessidade de proteção ambiental média.	Locais definidos como áreas de preservação ambiental pelos governos.

Tabela 26 – Pontuação Informações Operacionais

Critério C2 – Dano à Formação

Sub-critério / Pontuação	00-40	40-60	60-100
C2.1 - Expansão de Argila	Formações que não possuem em sua composição argilas expansivas, quando em contato com fluidos de perfuração convencionais.	Formações que possuem uma pequena quantidade, em sua composição, de argilas expansivas, quando em contato com fluidos de perfuração convencionais.	Formações que possuem em sua composição argilas expansivas, quando em contato com fluidos de perfuração convencionais.
C2.2 - Embebição Espontânea	Formações a onde não ocorre o fenômeno de embebição espontânea quando expostas à fluidos de perfuração convencionais.	Formações a onde ocorre o fenômeno de embebição espontânea, em pequena quantidade, quando expostas à fluidos de perfuração convencionais.	Formações a onde ocorre o fenômeno de embebição espontânea quando expostas à fluidos de perfuração convencionais.
C2.3 - Migração de Finos	Formações consolidada e que não produzem areia.	Formações que permitem que pequenas quantidades de finos sejam transportadas através dela.	Formações produtoras de areia ou inconsolidada que permitem que finos sejam transportadas através dela.
C2.4 - Vitrificação	Formações menos fechadas e com temperaturas baixas.	Formações com temperaturas baixas.	Formações muito fechadas e com altas temperaturas.

Tabela 27 - Pontuação Dano à Formação

Critério C3 – Problemas de Perfuração OB

Sub-critério / Pontuação	00-40	40-60	60-100
C3.1 Prisão de Coluna	Poços perfurados na área apresentaram poucas paradas motivadas pela prisão de coluna provocada pela diferença de pressão.	Poços perfurados na área apresentaram algumas paradas motivadas pela prisão de coluna provocada pela diferença de pressão.	Poços perfurados na área apresentaram muitas paradas motivadas pela prisão de coluna provocada pela diferença de pressão.
C3.2 Perda de Circulação	Poços perfurados na área não apresentaram ou apresentaram pouca perda de fluida para a formação.	Poços perfurados na área apresentaram alguns problemas de perda de fluida para a formação.	Poços perfurados na área apresentaram uma grande perda de fluidos para a formação.
C3.3 Baixa ROP	Formações menos consolidadas e que não apresentam taxas de penetração normais.	Formações duras na qual a taxa de penetração é normal.	Formações duras na qual a taxa de penetração é baixa e provocada pelo tipo de formação.
C3.4 Incompatibilidade Fluido x Fluido	Formações que não apresentam incompatibilidade entre os fluidos convencionais utilizados e os fluidos presentes na formação.	Formações que necessitam de fluidos não convencionais e caros para que seja evitada a incompatibilidade entre esse e os fluidos presentes na formação.	Formações que apresentam incompatibilidade entre os fluidos convencionais utilizados e os fluidos presentes na formação.
C3.5 Incompatibilidade Rocha x Fluido	Formações que não apresentam incompatibilidade entre os fluidos convencionais utilizados e os componentes da rocha reservatório.	Formações que necessitam de fluidos não convencionais para que seja evitada a incompatibilidade entre ele e os componentes da rocha reservatório.	Formações que apresentam incompatibilidade entre os fluidos convencionais utilizados e os componentes da rocha reservatório.

Sub-critério / Pontuação	00-40	40-60	60-100
C3.6 Invasão de Sólidos	Formações que não permite a invasão de sólidos presentes nos fluidos convencionais utilizados.	Formações que permite pequena quantidade de invasão de sólidos presentes nos fluidos convencionais utilizados.	Formações que permite grande quantidade de invasão de sólidos presentes nos fluidos convencionais utilizados..
C3.7 Trapeamento de Fase	Formações que não apresentam <i>trapeamento</i> de fases aquosa dos fluidos da formação quando se utiliza fluido de perfuração convencional.	Formações que pode apresentam <i>trapeamento</i> de fases aquosa dos fluidos da formação quando se utiliza fluido de perfuração convencional.	Formações que apresentam <i>trapeamento</i> de fases aquosa dos fluidos da formação quando se utiliza fluido de perfuração convencional.

Tabela 28 – Pontuação Problemas de perfuração OB

Critério C4 – Problemas de Perfuração UB

Sub-critério / Pontuação	00-40	40-60	60-100
C4.1 Alta Pressão x Alta Permeabilidade	Formações que não apresentam alta pressão de poros associada à alta permeabilidade da formação.	Formações que não apresentam média pressão de poros e média permeabilidade da formação.	Formações que apresentam alta pressão de poros associada à alta permeabilidade da formação.
C4.2 Poços Rasos	Poço mais profundo que não apresente dificuldade de controle da pressão no fundo do poço e assegure a continuidade da condição <i>underbalanced</i> .	Poço que não apresente dificuldade de controle da pressão no fundo do poço e assegure a continuidade da condição <i>underbalanced</i> .	Poço raso que apresente dificuldade de controle da pressão no fundo do poço e assegure a continuidade da condição <i>underbalanced</i> .
C4.3 Formação de Cone	Poço que não necessite de um drawdown excessivo.	Poço que necessite de um <i>drawdown</i> médio.	Poço que necessite de um <i>drawdown</i> excessivo.
C4.4 Movimentação Frequente da Coluna	Poços que não necessitam de trocas frequentes de broca e nem de muitas fases de perfuração.	Poços que necessitam de trocas frequentes de broca mais não necessitam de muitas fases de perfuração.	Poços que necessitam de trocas frequentes de broca e de muitas fases de perfuração.
C4.5 Perfuração de Longos Intervalos	Perfuração continua de pequenos intervalos.	Perfuração continua de intervalos médios que não geram grandes <i>drawdown</i> .	Perfuração continua de longos intervalos que geram grandes <i>drawdown</i> .

Sub-critério / Pontuação	00-40	40-60	60-100
C4.6 Variação da Pressão de Poros	Perfuração de seções que contenham formações sem variedade de pressão na formação.	Perfuração de seções que contenham formações com pouca variedade de pressão na formação.	Perfuração de seções que contenham formações com uma grande variedade de pressão na formação.
C4.7 Alto Índice de H ₂ S	Produção de fluidos com baixo índice de H ₂ S.	Produção de fluidos com índice médio de H ₂ S	Produção de fluidos com alto índice de H ₂ S.

Tabela 29 – Pontuação Problemas de perfuração UB