

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Análise do Valor da Informação na Avaliação e Desenvolvimento de Campos de Petróleo

Autor: Alexandre M. Xavier
Orientador: Prof. Dr. Denis J. Schiozer

12/2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Análise do Valor da Informação na Avaliação e Desenvolvimento de Campos de Petróleo

Autor: **Alexandre M. Xavier**
Orientador: **Prof. Dr. Denis J. Schiozer**

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à Subcomissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2004
S.P. – Brasil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Valor da Informação na Avaliação
e Desenvolvimento de Campos de Petróleo**

Autor: **Alexandre M. Xavier**

Orientador: **Prof. Dr. Denis J. Schiozer**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Denis J. Schiozer, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Prof. Dr. Osvaldo Vidal Trevisan
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Dra. Solange da Silva Guedes
Petrobrás S.A.

Campinas, 07 de dezembro de 2004

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Elza e Heribaldo, e à minha irmã, Cristiane.

Agradecimentos

Expresso meus agradecimentos:

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, sobretudo nos momentos mais difíceis.

À Noele, por me incentivar e apoiar em todos os momentos durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Denis José Schiozer, por me orientar desde a graduação até agora, pela paciência e profissionalismo, e por acreditar na realização e conclusão deste trabalho.

A todos os professores do DEP e do Instituto de Geociências que contribuíram para o meu aprendizado.

Aos amigos e colaboradores do UNISIM, em especial Eliana, Rogério, Célio e Paulo pelo apoio.

À Giselle e aos estagiários do DEP, pelo suporte computacional prestado.

A Fátima, Délcio e Alice, pelo suporte fornecido ao desenvolvimento deste trabalho.

À Agência Nacional de Petróleo e ao CEPETRO, por contribuírem com o suporte financeiro para a realização deste trabalho.

A vida é uma oportunidade de ousar.
(George Clemenceau)

Resumo

XAVIER, Alexandre Monticuco. *Análise do Valor da Informação na Avaliação e Desenvolvimento de Campos de Petróleo*. Campinas, 2004. 159pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2004.

A capacidade de lidar com incertezas pode ser um fator decisivo para viabilizar projetos de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo. Um critério econômico utilizado em processos de tomada de decisões é o valor da informação (VDI) que envolve a quantificação das incertezas, a avaliação econômica de diversos cenários de desenvolvimento e a quantificação dos benefícios que dados adicionais podem trazer ao processo. O cálculo do VDI pode ser complexo e demorado, principalmente nas fases de avaliação e desenvolvimento, em que uma modelagem detalhada do problema pode ser necessária. Nessas fases, a quantificação do VDI, assim como o de adicionar flexibilidade ao processo (valor da flexibilização - VDF), deve levar em conta os benefícios que podem ser extraídos do processo através da aplicação de estratégias de produção mais adequadas para os vários cenários possíveis. A quantificação do VDI e VDF, portanto, exige que a estratégia de produção seja determinada para cada cenário possível. Como isso geralmente não é viável, devido ao grande esforço que seria exigido, existem simplificações possíveis, como a determinação de modelos geológicos representativos (MGR) que podem fornecer a incerteza agregada dos atributos geológicos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar uma metodologia de cálculo do VDI durante as fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo com aplicação para casos simples e complexos, considerando diferentes números de parâmetros analisados. Esta etapa é realizada através da aplicação da metodologia em três exemplos, sendo dois casos teóricos, visando expor o conceito do VDI e VDF, e um caso real complexo, visando o cálculo do VDI para um caso utilizando a simplificação do processo. Os resultados indicam que a precisão do cálculo do VDI depende do número de MGR e a melhor forma de avaliação é através da aplicação das melhores estratégias em todos os cenários. Uma boa aproximação do VDI pode ser obtida pelo procedimento de inclusão gradativa de MGR até a estabilização dos resultados. Outra simplificação possível é usar também os MGR para representar a árvore no cálculo do VDI, mas com prejuízo de precisão nos resultados.

Palavras-chave: Valor da Informação, Valor da Flexibilização, Análise de Risco, Quantificação de Incertezas, Simulação de Reservatórios de Petróleo

Abstract

XAVIER, Alexandre Monticuco. *Analysis of the Value of Information in the Appraisal and Development of Oil Fields*. Campinas, 2004. 159pp. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2004.

The capacity to deal with uncertainties is responsible for the economic viability of petroleum fields. The Value of Information (VOI) is an economic criterion used in decision-making process. It involves the quantification of uncertainties and the economic evaluation of various development scenarios. The quantification of the value of the information (VOI) and flexibility (VOF) can be highly complex and time-consuming, mainly in the appraisal and development phases when a detailed modeling of the problem may be necessary. The quantification of the value of information and of flexibility must take into account the benefits that can be extracted of the process. In these phases, these benefits result from a specific production strategy applied to several possible scenarios after the acquisition of the information. Therefore, the quantification of the VOI and VOF demand that the production strategy be determined to each possible scenario. This is not usually viable because a great effort would be needed; to circumvent this problem, there are some alternatives, such as the determination of geologic representative models (GRM) that can represent the uncertainty of the geologic attributes. The objective of this work is to develop and apply a methodology that can calculate the value of information during the appraisal and development phases in petroleum fields which can be applied to simple and complex cases, considering the number of analyzed parameters. This stage is realized through the application of the methodology to three examples; two theoretical models showing the concept of the value of information and, one real and complex case that demands a detailed analysis of the process. The results show that the quality of the results depends on the number of GRM and the best quantification technique is to apply the best production strategy to all possible scenarios. It is shown in this work that a good approximation of the VOI can be obtained by a dynamic procedure including new GRM until a stabilization of the results. The GRM can be used also to represent the decision tree but with some deterioration of the results.

Key words: Value of Information, Value of Flexibility, Risk Analysis, Quantification of Uncertainty, Petroleum Reservoir Simulation

Índice

Dedicatória.....	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Índice	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvi
Nomenclatura.....	xvii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Revisão Bibliográfica	5
1.1.1 Valor da Informação	6
1.1.2 Valor da Flexibilização.....	13
1.2 Motivação	19
1.3 Objetivos.....	20
1.4 Organização da dissertação	21
Capítulo 2	22
Conceitos - Fundamentação Teórica	22
2.1 Análises de Incerteza e Risco	22
2.1.1 Tratamento de incertezas	28
2.1.2 Composição do Caso Base	30
2.1.3 Otimização da estratégia para o Caso Base	30

2.1.4	Análise de Sensibilidade.....	31
2.1.5	Simulação dos modelos do reservatório	32
2.1.6	Curva de Risco do Projeto	32
2.1.7	Escolha dos Modelos Representativos	34
2.2	Modelos Representativos.....	34
2.3	Valor da Informação	36
2.3.1	Análise de decisão	37
2.3.2	Análise econômica.....	40
2.3.3	Árvore de decisão	42
2.3.4	Estatística.....	46
2.3.5	Informação Completa	47
2.3.6	Informação Incompleta.....	50
2.3.7	Informação com poucas variáveis	53
2.3.8	Informação com muitas variáveis.....	53
Capítulo 3	.....	54
Metodologia Proposta.....		54
3.1	Metodologia.....	54
3.1.1	Composição da curva de risco do projeto.....	57
3.1.2	Composição da árvore de derivação.....	58
3.1.3	Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão.....	58
3.1.4	Informação Completa	60
3.1.5	Informação Incompleta.....	60
3.1.6	Escolha dos Modelos Representativos	61
3.1.7	Otimização dos Modelos Representativos.....	62
3.1.8	Cálculo dos VME sem e com informação	62
3.1.9	Determinação das probabilidades de ocorrência dos MGR.....	66
3.1.10	Cálculo do valor da informação.....	72
Capítulo 4	.....	73
Aplicações e Resultados		73
4.1	Exemplos I e II	73
4.1.1	Exemplo I	76

4.1.2	Exemplo II	81
4.2	Exemplo III.....	87
4.2.1	Definição dos atributos incertos	89
4.2.2	Composição do caso base	91
4.2.3	Otimização da estratégia para o caso base.....	93
4.2.4	Análise de sensibilidade	93
4.2.5	Composição da curva de risco inicial para a estratégia inicial	96
4.2.6	Composição da árvore de derivação	96
4.2.7	Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão.....	98
4.2.8	Escolha dos modelos geológicos representativos (MGR)	98
4.2.9	Cálculo dos VME com e sem informação – Método 1 – Árvore Completa.....	99
4.2.10	Cálculo dos VME com e sem informação – Método 2 – MGR	116
4.2.11	Comparação entre métodos	130
4.2.12	Discussões finais	131
Capítulo 5	.....	134
Conclusões e Recomendações	.....	134
5.1	Conclusões.....	134
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	137
Referências Bibliográficas	.....	139
Anexo 1	.....	145
Exemplos I e II	.....	145
Curvas de Permeabilidade Relativa	.....	145
Anexo 2	.....	147
Exemplo III	.....	147
Processo de otimização dos modelos representativos	.....	147
Curvas de permeabilidade relativa	.....	156
Tabelas PVT	.....	157

Lista de Figuras

Figura 1.1. Aplicações do VDI e VDF.	4
Figura 1.2. Cálculo da flexibilização do sistema de injeção.	15
Figura 1.3. Flexibilização do sistema de produção.	17
Figura 1.4. Situação em que o VDI, o VDF e a análise determinística são apropriados (Begg et al., 2002).	18
Figura 2.1. Relação da avaliação do risco e VPL do projeto (Demirmen, 2001).	24
Figura 2.2. Integração das incertezas na Análise de Risco (Schiozer et al., 2004).	25
Figura 2.3. Fluxograma do processo de análise de risco.	26
Figura 2.4. Exemplo de função densidade de probabilidade discretizada em três níveis.	28
Figura 2.5. Exemplo de função densidade de probabilidade discretizada em vários níveis.	29
Figura 2.6. Curvas de risco hipotéticas.	33
Figura 2.7. Impacto da aquisição de informações no VPL acumulado do projeto (modificada de Demirmen, 2001).	37
Figura 2.8. Fluxo de caixa típico de um projeto exploratório [Suslick, 2001].	41
Figura 2.9. Árvore de derivação utilizada no cálculo do VME.	42
Figura 2.10. Distribuição de probabilidade da função objetivo VPL.	43
Figura 2.11. Curva de risco para a função objetivo VPL.	43
Figura 2.12. Árvore de decisão.	44
Figura 2.13. Árvore de decisão parcialmente completa.	46
Figura 2.14. Função densidade de probabilidade (fdp) de um parâmetro (x) discretizada em 3 níveis.	48
Figura 2.15. Árvore de derivação com 3 possibilidades de ocorrência (3 níveis).	49

Figura 2.16. Árvore de decisão com 3 possibilidades de ocorrência (3 níveis).	49
Figura 2.17. Árvore de decisão com 3 possibilidades de ocorrência (simplificada).	49
Figura 2.18. Função densidade de probabilidade discretizada para a informação incompleta.	51
Figura 2.19. Árvore de decisão com 2 níveis, cada um com 3 derivações.	52
Figura 2.20. Árvore de decisão com 2 níveis, cada um com 2 derivações (simplificado).	52
Figura 3.1. Fluxograma da metodologia proposta para o cálculo do valor da informação.	56
Figura 3.2. Exemplos de curvas de risco de um projeto (modificada de Demirmen, 2001).	58
Figura 3.3. Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão.	59
Figura 3.4. Cálculo da probabilidade de ocorrência dos MGR pelo método das nuvens.	68
Figura 3.5. Exemplo de cálculo das probabilidades dos MGR 1 e 7 pelo método dos ramos (a figura representa parte da árvore na vertical e o grupo 1 é representado por 2 MGR).	69
Figura 4.1. Modelo de reservatório com incerteza – Exemplo I.	74
Figura 4.2. Modelo de reservatório com incerteza – Exemplo II.	75
Figura 4.3. Custo do sistema de produção em função do número de poços (modificado de: Revista Brasil Energia).	76
Figura 4.4. Árvore de decisão para o Exemplo I.	78
Figura 4.5. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) em função da probabilidade de ocorrência da área incerta.	81
Figura 4.6. Ramificação da árvore de decisão para o exemplo II – Com flexibilização.	82
Figura 4.7. Ramificação da árvore de decisão para o Exemplo II – Com informação.	83
Figura 4.8. Ramificação da árvore de decisão para o Exemplo II – Sem informação.	83
Figura 4.9. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI)	85
Figura 4.10. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para probabilidades iguais de ocorrência das áreas incertas P1 e P2, considerando somente uma informação obtida.	86
Figura 4.11. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para diferentes probabilidades de ocorrência das áreas incertas, considerando duas informações obtidas.	86

Figura 4.12. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para diferentes probabilidades de ocorrência das áreas incertas, considerando somente uma informação obtida.	87
Figura 4.13. Mapa de topo [m] da malha de simulação.	88
Figura 4.14. Diferenciação entre os níveis do atributo modelo estrutural (areas).....	91
Figura 4.15. Estratégia inicial para o caso base (mapa de saturação de água).	92
Figura 4.16. Análise de sensibilidade para a função objetivo VPL (20 anos).....	94
Figura 4.17. Análise de sensibilidade para a função objetivo Np (20 anos).	95
Figura 4.18. Análise de sensibilidade para a função objetivo Wp (20 anos).	95
Figura 4.19. Curva de risco do projeto.	96
Figura 4.20. Árvore de derivação.	97
Figura 4.21. Árvore de decisão subdividida em 6 grupos.	100
Figura 4.22. Concentração das probabilidades de ocorrência para cada modelo.	101
Figura 4.23. Ordem de escolha dos 12 modelos geológicos representativos (MGR).	102
Figura 4.24. Comparação entre os VPL dos 12 MGR antes e depois da otimização.	103
Figura 4.25. Diferença do número de poços para cada estratégia otimizada.	104
Figura 4.26. Variação da produção acumulada de óleo e água para cada MGR.	104
Figura 4.27. Cálculo do VDI através da simulação de cada estratégia otimizada dos MGR em todos os ramos da árvore de derivação e decisão.	106
Figura 4.28. Variação dos grupos no gráfico VPL versus FR.	106
Figura 4.29. Cálculo do VME de cada estratégia otimizada dos MGR em todos os ramos da árvore de derivação.	107
Figura 4.30. Curvas de risco com e sem informação para 2 atributos.	108
Figura 4.31. Árvore de decisão subdividida em 54 grupos.	109
Figura 4.32. Análise dos 54 grupos da árvore de decisão.	110
Figura 4.33. Variação do VDI e dos VME com e sem informação.	111
Figura 4.34. Curvas de risco com e sem informação para 2 atributos.	111
Figura 4.35. Função densidades de probabilidade da permeabilidade horizontal discretizada para a informação incompleta.	112
Figura 4.36. Árvore de decisão subdividida em 36 grupos.	114
Figura 4.37. Variação do VDI e dos VME com e sem informação.	115

Figura 4.38. Comparação entre os VDI completa e incompleta.....	115
Figura 4.39. Escolha dos 3 modelos geológicos representativos (MGR).....	116
Figura 4.40. Escolha dos 4 modelos geológicos representativos (MGR).....	117
Figura 4.41. Escolha dos 5 modelos geológicos representativos (MGR).....	117
Figura 4.42. Escolha dos 6 modelos geológicos representativos (MGR).....	118
Figura 4.43. Escolha dos 7 modelos geológicos representativos (MGR).....	118
Figura 4.44. Escolha dos 8 modelos geológicos representativos (MGR).....	119
Figura 4.45. Escolha dos 9 modelos geológicos representativos (MGR).....	119
Figura 4.46. Escolha dos 10 modelos geológicos representativos (MGR).....	120
Figura 4.47. Escolha dos 11 modelos geológicos representativos (MGR).....	120
Figura 4.48. Escolha dos 12 modelos geológicos representativos (MGR).....	121
Figura 4.49. Probabilidades dos 3 MGR.	122
Figura 4.50. Probabilidades dos 4 MGR.	122
Figura 4.51. Probabilidades dos 5 MGR.	122
Figura 4.52. Probabilidades dos 6 MGR.	122
Figura 4.53. Probabilidades dos 7 MGR.	122
Figura 4.54. Probabilidades dos 8 MGR.	122
Figura 4.55. Probabilidades dos 9 MGR.	123
Figura 4.56. Probabilidades dos 10 MGR.	123
Figura 4.57. Probabilidades dos 11 MGR.	123
Figura 4.58. Probabilidades dos 12 MGR.	123
Figura 4.59. Exemplo de árvores de derivação e decisão simplificadas com 12 MGR.	125
Figura 4.60. Variação do VDI e do VME com e sem informação para diferentes métodos de cálculo das probabilidades dos MGR.	126
Figura 4.61. Curvas de risco considerando diferentes métodos de cálculo das probabilidades..	127
Figura 4.62. Variação do VDI em função do nº de MGR e variação do VDI e do VME com e sem informação para diferentes métodos de cálculo das probabilidades dos MGR.	128
Figura 4.63. Curvas de risco considerando diferentes métodos de cálculo das probabilidades..	130
Figura 4.64. Nº de simulações em função do nº de estratégias otimizadas para os métodos da Árvore Completa e dos MGR.	133
Figura 4.65. Nº de simulações em função do nº de estratégias otimizadas.	133

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Custos associados às opções de investimento (Begg <i>et al.</i> , 2002).....	14
Tabela 1.2. VPL e probabilidades de ocorrência para cada cenário possível (Begg <i>et al.</i> , 2002). 15	
Tabela 1.3. Custos dos sistemas de produção (Begg <i>et al.</i> , 2002).....	16
Tabela 1.4. VPL, probabilidades de ocorrência e taxas de produção (Begg <i>et al.</i> , 2002).....	17
Tabela 2.1. Dados do Exemplo.....	45
Tabela 3.1. Exemplo de cálculo das probabilidades dos MGR 1 a 7 pelo método dos ramos.	69
Tabela 3.2. Exemplo de cálculo das probabilidades dos MGR 1 a 6 pelo método das distâncias. 71	
Tabela 4.1. Dados econômicos necessários para o cálculo de VDI e VDF.....	76
Tabela 4.2. Características dos modelos otimista e pessimista do Exemplo I.....	78
Tabela 4.3. Características dos modelos otimista, médio e pessimista do Exemplo II.	82
Tabela 4.4. Parâmetros para análise econômica.	89
Tabela 4.5. Atributos incertos.....	90
Tabela 4.6. Disposição dos poços produtores e injetores.	92
Tabela 4.7. Otimização do Modelo Base.....	93
Tabela 4.8. Cálculo do VDI para 12 MGR.....	131

Nomenclatura

Abreviações

areas	modelo estrutural
cpor	compressibilidade da rocha
dwoc	contato óleo-água
G	número de grupos da árvore
kr	permeabilidade relativa
kro	curvas de permeabilidade relativa do óleo e da água
n_{MGR}	número de modelos geológicos representativos
n_{EST}	número de estratégias otimizadas
N	número total de modelos ou cenários possíveis
N_G	número de modelos ou cenários por grupo
p	probabilidade associada
permx	permeabilidade horizontal
permz	permeabilidade vertical
por	porosidade
PVT	tabela de pressão-volume-temperatura para óleo e gás

Letras Gregas

μ	média
σ	desvio-padrão

Siglas

CDI	Custo da informação
E&P	Exploração e produção na indústria do petróleo
Fdp	Função densidade de probabilidade
FR	Fator de recuperação de óleo
MGR	Modelo geológico representativo
N_p	Produção acumulada de óleo
VDI	Valor da informação
VDF	Valor da flexibilização
VE	Valor esperado
VME	Valor monetário esperado
VME_{CI}	Valor monetário esperado com informação
VME_{SI}	Valor monetário esperado sem informação
VOOIS	Volume de óleo originalmente <i>in situ</i>
VPL	Valor presente líquido
W_p	Produção acumulada de água

Subscritos

0	nível provável (base)
1	nível pessimista
2	nível otimista
i	índice que varia de 1 a n_{MGR}
j	índice que varia de 1 a N
k	índice que varia de 1 a G
ℓ	índice que varia de 1 a N_G
w	índice que varia de 1 a n_{EST}

Capítulo 1

Introdução

Na indústria de exploração e produção (E&P) de petróleo, o desenvolvimento de campos ou reservatórios de óleo e gás é feito sob condições de incertezas, não somente relacionadas à caracterização geológica do reservatório, mas também no que diz respeito aos parâmetros econômicos, tecnológicos e políticos.

Durante as fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo, principalmente dos campos marítimos, estão associadas a um elevado número de incertezas com forte impacto nos resultados financeiros e altos investimentos, de modo que o processo de tomada de decisão deva ser um procedimento probabilístico e não mais determinístico, como realizado no passado. Procedimentos probabilísticos são mais comuns na fase exploratória e metodologias de análise do problema são bem definidas [Newendorp, 1975 e Rose, 2001]. Nas fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo, a importância das incertezas sobre o fator de recuperação cresce significativamente; entretanto, diferente da fase de exploração, metodologias probabilísticas ainda estão em estudo, pois necessitam de simplificações, devido ao alto custo computacional da modelagem do reservatório.

Begg *et al.* [2002] afirmam que o baixo desempenho da indústria E&P de petróleo é largamente atribuído ao baixo investimento alocado em processos de tomada de decisão. Dentre muitos, a incerteza é um dos fatores dominantes que influenciam o valor do projeto. Esta mesma incerteza pode ser derivada de análises incompletas, falta de conhecimento e resultados de

processos e eventos que são efetivamente estatísticos. A falta de investimentos suficientes para estimar o retorno pode implicar na superestimação destes retornos ou na subestimação de riscos de perda.

Uma metodologia para a quantificação do risco nas fases de avaliação e desenvolvimento foi proposta por Loschiavo [1999] e implementada por Steagall [2001], Santos [2002] e Costa [2003]. Esta metodologia propõe uma análise de sensibilidade para reduzir o número de atributos incertos e a elaboração de uma árvore de derivação constituída pelos atributos críticos, sendo que cada ramo da árvore corresponde a um modelo de simulação. O emprego da simulação numérica de reservatórios na predição de produção é responsável pelo aumento de confiabilidade dos resultados. Esta metodologia pode necessitar de elevado esforço computacional e tempo do processo. Contudo, algumas simplificações podem viabilizar esta metodologia, tais como: automação do processo e emprego de computação paralela [Ligero e Schiozer, 2002], tratamentos especiais aos atributos geológicos [Costa & Schiozer, 2003], tratamento da estratégia de produção [Santos e Schiozer, 2003] e modelos de simulações rápidos [Ligero *et al.*, 2003].

Durante a fase de avaliação do campo ou reservatório, torna-se necessário, em algum momento, avaliar a continuidade dos investimentos, visando definir o desenvolvimento do projeto. O conhecimento acumulado obtido na fase inicial é pequeno, devido à baixa quantidade de informações coletadas. Desse modo, o tomador de decisão encontra-se frente a três possibilidades [Santos, 2002]:

- Optar pelo abandono do horizonte produtor: decisão tomada quando os dados disponíveis indicam que se trata de um horizonte com pouca ou nenhuma atratividade econômica.
- Investir na coleta de informações adicionais sobre o reservatório: novos levantamentos sísmicos, novos processamentos, perfuração de mais poços de delimitação, execução de testes de pressão, realização de testes mais detalhados, implantação de um plano piloto de produção, etc.
- Definir e implantar um plano de desenvolvimento do reservatório, individualmente ou em conjunto com outra companhia. Neste caso, grandes investimentos serão definidos e alocados ao projeto numa fase em que o conhecimento sobre a jazida ainda é reduzido.

A decisão de abandonar, prosseguir ou esperar e obter novas informações pode parecer simples ou trivial, mas existem muitas particularidades e inúmeras variáveis que podem influenciar o processo de análise de decisão devido ao elevado grau de incertezas. Por isso, o foco principal do presente trabalho é determinar uma metodologia viável para quantificar o valor de se investir na coleta de mais informações sobre o projeto (valor da informação – VDI), ou seja, quantificar a relevância, do ponto de vista econômico, da obtenção de novas informações.

O risco envolvido na fase de desenvolvimento pode ser reduzido pela obtenção de informações adicionais que podem diminuir ou até mesmo remover determinada incerteza. Contudo, a aquisição de novas informações está diretamente associada a um custo. De acordo com Mian [2002], antes da decisão de aquisição de qualquer informação adicional as seguintes questões devem ser respondidas: (1) vale a pena obter a informação adicional? e (2) havendo várias fontes potenciais de informação capazes de melhorar o processo de decisão, qual delas é preferida?

Segundo Coopersmith e Cunningham [2002], a informação sobre o resultado incerto de um determinado evento pode ser perfeita, se possibilita a resolução completa da incerteza, ou imperfeita, se conduz a uma resolução parcial da incerteza. O valor de uma informação imperfeita é sempre menor que o valor de uma informação perfeita, que representa o máximo que a informação pode valer.

Na definição do plano de desenvolvimento, o risco pode ser minimizado através da flexibilização do sistema produtivo, de maneira que o projeto se torne versátil o suficiente para suportar a produção e injeção de fluidos em cenários pessimistas e otimistas. A quantificação dos benefícios deste procedimento é denominado valor da flexibilização (VDF).

A flexibilização pode ser completa ou incompleta. A flexibilização completa corresponde à possibilidade de tornar o dimensionamento do sistema produtivo totalmente flexível, ou seja, após a definição do sistema, diversas alterações podem ser feitas no mesmo, como a adição de novos poços, plataformas ou equipamentos. Ao contrário da flexibilização completa, a flexibilização incompleta não possui esta versatilidade, apresentando algumas restrições, sejam

elas operacionais, técnicas, ou relacionadas à capacidade de armazenamento e tratamento de fluidos e segurança.

A Figura 1.1 mostra que, na presença de pouca incerteza, pode-se optar por não flexibilizar nem obter novas informações, iniciando-se imediatamente o desenvolvimento do campo. Entretanto, quando a incerteza agregada ao projeto é grande, pode-se desenvolver o campo, de maneira que esta decisão não tenha impacto no desenvolvimento do mesmo. Outra opção na presença de grandes incertezas e presentes é a obtenção de novas informações e flexibilização do sistema de produção. Já na presença de grandes incertezas e no caso futuras, pode-se flexibilizar o sistema de produção, ou seja, gerenciar a incerteza através da flexibilização.

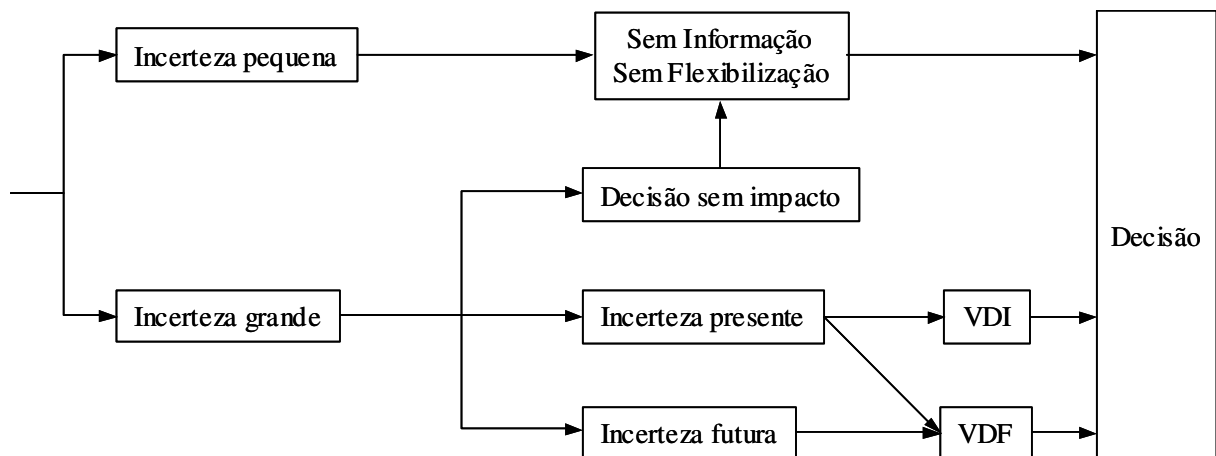


Figura 1.1. Aplicações do VDI e VDF.

Uma análise do valor da informação pode ser feita através do cálculo da diferença do valor monetário esperado (VME^1) com e sem informação [Demirmen, 1996 e 2001; Koninx, 2000; Begg *et al.*, 2002]. Se o valor de uma informação for inferior ao custo da aquisição da informação, a informação adicional não deve ser obtida. A análise e cálculo do valor de informação são usualmente descritos por árvores de derivação e decisão, mas podem ser explorados por outros métodos, como Monte Carlo e opções reais, todos caracterizados por diferentes vantagens e desvantagens.

¹ O conceito de valor médio esperado é bem difundido na indústria do petróleo. Para mais detalhes, vide Item Análise Econômica, Equação 2.4.

O cálculo preciso do valor de informação e de flexibilização pode ser muito complexo e demorado, pois é um processo probabilístico. Isso se agrava nas fases de avaliação e desenvolvimento, em que uma modelagem detalhada do problema pode ser necessária. A quantificação desses valores (VDI e VDF) deve levar em conta os benefícios que podem ser extraídos do processo. Nas fases citadas acima, esses benefícios só podem ser calculados através da quantificação dos benefícios da aplicação de uma estratégia de produção mais adequada, considerando todos os cenários possíveis resultantes da obtenção da informação. A quantificação do VDI e VDF, portanto, exige que a estratégia de produção seja determinada para cada cenário possível. Como isso geralmente não é viável, devido ao grande esforço que seria exigido, existem algumas hipóteses e suposições que podem ser consideradas para simplificar e viabilizar o cálculo. Algumas delas são utilizadas e discutidas neste trabalho.

Existem muitas justificativas plausíveis para a realização da análise do valor da informação em diversas áreas e setores, por exemplo, a análise de investimentos que devem ser empregados na área de mineração, setor automotivo, telecomunicações, etc. No setor petrolífero, em especial durante as fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo, a determinação da estratégia e dimensionamento do sistema de produção e de injeção, em geral para um período de 15 a 20 anos, depende fortemente de diversos parâmetros incertos correlacionados entre si, que geram um grande número de cenários possíveis. Cabe à equipe gerencial tomar a decisão de investir ou não nestes projetos ou obter novas informações como auxílio a este processo.

1.1 Revisão Bibliográfica

As literaturas explicitadas a seguir têm como objetivo mostrar a relevância e aplicação da análise do valor da informação no auxílio do processo de decisão e análise de risco em projetos de E&P de petróleo. Contudo, nenhuma tentativa sistemática foi, ainda, desenvolvida para explorar o potencial e as implicações da metodologia do valor da informação exclusivamente na fase de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo.

1.1.1 Valor da Informação

Atualmente, o conceito de análise do valor da informação está amplamente difundido. Existem aplicações deste conceito para a fase de exploração de petróleo, mas não existe uma metodologia clara de como aplicá-la nas fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo, principalmente quando a modelagem do problema é feita através da simulação numérica de reservatórios, que é uma ferramenta que demanda alto esforço computacional. A princípio, para casos simples, a análise do valor da informação pode ser considerada uma técnica de fácil compreensão. Todavia, torna-se complexa quando um grande número de parâmetros incertos é utilizado, quando a informação afeta diferentes atributos geológicos e quando a informação não é completa ou confiável.

Um dos trabalhos pioneiros relacionados ao cálculo do valor da informação foi desenvolvido por Warren [1983]. O autor relata o impasse entre iniciar ou rejeitar o desenvolvimento de um projeto ou postergar a decisão até quando mais informações forem adquiridas e analisadas em determinado tempo.

Lohrenz [1988] apresenta um método para orientar importantes tomadas de decisão na engenharia de petróleo através do cálculo do valor da informação, ilustrados em quatro exemplos, em que a informação obtida pode ser favorável (boas notícias) ou não favorável (más notícias). Não obstante, deve-se considerar o fato da informação estar errada.

O autor discute também o fato de que a informação é obtida para orientar decisões futuras ou subseqüentes. Entretanto, a informação pode ser produzida ou adquirida para outros propósitos, como para criar uma imagem ou dar a impressão de que a mesma será útil de qualquer maneira, em vez de realmente aumentar a chance de melhores decisões futuras. Um exemplo específico seria o grande investimento em alta tecnologia por parte dos gerentes, mas sem dar a devida atenção aos resultados, tomando decisões por intuição. Questiona-se, então, se é pertinente pagar por algo que talvez possa não ser utilizado.

A obtenção de informações dadas como certas pode gerar falsas expectativas. Ao acreditar que estas informações são totalmente corretas, existe uma tendência que pode gerar uma projeção otimista, de forma que o desempenho tenda a ser menor que estas projeções (Lohrenz, 1988). Pode-se acrescentar ao comentário do autor que uma projeção pessimista também pode levar a resultados sub-ótimos.

O autor cita ainda que o efeito do preço do óleo como um fator de grande influência na análise foi estudado, mostrando que, com sua queda, apesar de diminuir o valor do projeto, faz com que a informação seja mais valiosa quando a variação do máximo valor da informação em relação ao preço é negativa. Caso contrário, quando esta variação é positiva, o valor da informação declina rapidamente com o preço do óleo. Entretanto, deve-se ressaltar a existência de projetos em que o valor da informação e o preço do óleo não seguem necessariamente o mesmo padrão descrito acima.

Gerhardt *et al.* [1989] discutem as vantagens e desvantagens do método de cálculo proposto por Lohrenz [1988]. Afirmam que a informação adicional deveria ser obtida somente se a mesma contribui para o aumento do valor esperado e para a redução do risco do investimento da companhia.

Em geral, o valor da informação adicional depende do grau de incerteza presente na caracterização do reservatório, da representatividade da informação e da opção de flexibilização.

Umas das dificuldades da implementação deste método é o estabelecimento das probabilidades dos eventos, embora casos históricos ou estudos detalhados de relatórios governamentais possam fornecer uma magnitude destas probabilidades.

Dunn [1992] descreve uma técnica numérica para o cálculo do valor da informação perfeita através da obtenção de perfis de poços, utilizando conceitos como a perda de oportunidade, esperança parcial, expectativa de perda e distribuição de probabilidade. O autor define também o valor presente líquido e o potencial de perda como funções do parâmetro que está sendo medido, de forma que o valor da informação possa ser quantificado.

O autor relata sobre a sensibilidade do tipo de distribuição de probabilidade usada para descrever a incerteza do parâmetro em questão. Embora possa ser difícil assumir uma distribuição normal, triangular ou uniforme, deve-se verificar os efeitos de cada distribuição no cálculo do valor da informação.

Dunn [1992] afirma também que a informação somente tem valor se a mesma tem capacidade de alterar futuras decisões que podem minimizar a perda ou proporcionar ganho financeiro. Exemplos citados em seu trabalho mostram que em situações em que a incerteza é baixa e os potenciais de perda são pequenos, o valor da informação é baixo. Por outro lado, se a incerteza e os potenciais de perda são altos, o valor da informação é alto. Pode-se acrescentar que nem sempre incertezas altas resultam em VDI altos; isso só ocorre se a informação afetar significativamente a decisão após a sua coleta.

Clemen [1995] demonstra algumas técnicas usadas para calcular o valor da informação, como o diagrama de influência e a árvore de decisão. Ele também diferencia os conceitos de informação perfeita e imperfeita no cálculo do valor da informação, em que a informação perfeita é considerada como sempre correta, eliminando todo tipo de incerteza do problema, sendo a melhor situação possível. Já a informação imperfeita está sujeita a erros (pode-se acrescentar aos comentários do autor que a informação imperfeita ou incompleta pode também não tirar totalmente a dúvida sobre a incerteza a qual está sendo minimizada). Além disso, explicita que o valor esperado da informação pode ser zero ou positivo, mas nunca negativo. E que o valor esperado de qualquer fonte de informação deve estar entre zero e o valor esperado do valor da informação perfeita (totalmente correta, eliminando todo tipo de incerteza).

Demirmen [1996] afirma que o conceito de “Valor da Informação” pode ser aplicado à avaliação de sub-superfície na exploração e produção de petróleo, para proporcionar um critério consistente que justifique tal atividade. O uso do valor da informação deve ajudar a evitar a sub-avaliação e a super-avaliação, em que ambos representam perda de recursos que influenciam a lucratividade do projeto. Introduz ainda alguns conceitos sobre informação completa, informação parcial completamente confiável e informação parcial não completamente confiável.

Na fase de exploração, as sísmicas 2D e 3D podem ser utilizadas na obtenção de novas informações e na redução de incertezas. Aylor [1999] afirma que diversas metodologias podem ser usadas para prever se uma determinada tecnologia (no caso a sísmica 3D) será capaz de evitar a perfuração de poços secos e maximizar a incidência de poços com a presença de óleo.

Comenta que a sísmica 3D tem-se mostrado extremamente importante no desempenho das operações de E&P para a Amoco. Uma análise é feita em seu trabalho para prever o impacto da sísmica 3D em determinadas áreas, através da utilização da árvore de decisão implícita no diagrama de Venn, usando os conceitos da inversão de Bayes.

Floris *et al.* [2000] mostram um estudo de caso utilizando um sistema de auxílio à decisão (método DSS), para analisar o valor da informação para um campo com incertezas em relação ao volume de óleo *in situ* subdividido em dois blocos, conectados ou não (posterior definição do sistema de produção), e à existência de algum mecanismo natural de produção, como um aquífero, expressivo ou não (posterior definição do sistema de injeção).

Koninx [2000] demonstra a metodologia de cálculo do valor da informação através de dois exemplos, utilizando a sísmica 3D e a perfuração de um poço na aquisição de novos dados (perfeitos ou imperfeitos) para o desenvolvimento de um determinado campo de petróleo. Afirma que a análise do valor da informação é raramente aplicada na prática, devido à complexidade e ao grande trabalho para lidar com diversos parâmetros e muitas hipóteses.

Demirmen [2001] discute o conceito de valor da informação como critério de decisão. O objetivo é reduzir o risco econômico com respeito ao desenvolvimento do campo. Comenta neste artigo que, quando uma descoberta é feita, a decisão de ir em frente com o desenvolvimento e como desenvolvê-la é cercada por incertezas. Relata sobre três tipos de risco de desenvolvimento: (1) oportunidade de perdas: quando um projeto é abandonado como não econômico, quando na verdade é econômico; (2) desenvolvimento não comercial: quando um campo não econômico é desenvolvido sob a errônea concepção de que é econômico; (3) desenvolvimento sub-ótimo: quando o desenvolvimento com relação ao rendimento do campo é menor que o máximo retorno econômico que poderia ser realizado se o modelo correto do reservatório fosse aplicado. Destaca

neste trabalho o desenvolvimento sub-ótimo. Nesta situação, grandes consequências afetam o plano de desenvolvimento do campo. Como exemplo, é citado um campo no Mar do Norte, mostrando erros envolvidos nesse processo na ordem de 300% com relação à capacidade de produção de água na comparação entre os dados de produção e o estimado.

O conceito relacionado com a quantificação dos benefícios (valor) desse tipo de informação é mais fácil de ser entendido *a posteriori*. A determinação do valor da informação antes da sua obtenção é um pouco mais complexa e deve levar em consideração todos os cenários possíveis de serem obtidos com a informação e suas respectivas probabilidades de ocorrência. A quantificação do VDI é resultado do benefício médio esperado que a informação pode proporcionar.

Begg *et al.* [2002] discutem como tomar melhores decisões focando o investimento em capital intelectual e financeiro em projetos na presença de incertezas. Discutem também que uma das principais causas do baixo desempenho da indústria do petróleo é o baixo investimento na tomada de decisões e a avaliação inexata dos impactos da incerteza.

No processo de decisão, os autores contestam: qual o valor da aquisição e análise de dados? Seria melhor lidar com a incerteza através do investimento na redução da mesma, ou elaborar um plano para gerenciá-la? Como a incerteza pode ser explorada para agregar um valor máximo ao projeto? Todas estas questões levam ao entendimento, utilização e comparação de técnicas como o valor da informação, o clássico fluxo de caixa descontado, o valor da flexibilização e as opções reais.

Os autores citam ainda três peças principais para o cálculo do valor da informação:

- As probabilidades estimadas dos possíveis resultados;
- A confiabilidade da informação, ou seja, a eficiência da informação em prever resultados;
- O valor do projeto em termos monetários para cada resultado possível.

Coopersmith *et al.* [2002] afirmam que o valor da informação é função da magnitude da incerteza da variável-chave para a qual se considera a informação obtida, da magnitude do impacto monetário futuro da decisão (dada a informação conhecida relacionada à variável

incerta) e da confiabilidade da informação. Propõem também uma metodologia de cálculo do valor da informação em doze passos:

- Estabelecer um caso base e identificar as variáveis que mais influenciam o projeto através da análise de sensibilidade, da árvore de decisão e da curva de risco;
- Listar e classificar itens de interesse, ou seja, observar o problema e dividi-lo em categorias como: Fatos (custos, VPL, etc.), Decisões (escolhas) e Incertezas (variáveis das quais não se têm controle);
- Determinar o foco do problema através de um diagrama triangular, separando as decisões relevantes em 3 categorias distintas: decisões já tomadas (planos de ação), decisões estratégicas e decisões a serem implementadas. Esta hierarquia nas decisões serve para determinar o impacto monetário futuro destas decisões e listar políticas e hipóteses relevantes que poderiam afetar o problema;
- Este passo utiliza uma tabela de incertezas que lista as incertezas-chave, as decisões associadas e as alternativas de informação relacionadas com cada incerteza;
- Isolar e avaliar as vantagens de obtenção da informação para uma determinada variável incerta de uma fonte de informação em um determinado tempo;
- Estruturar a análise do valor da informação representando a ordem cronológica das decisões que são tomadas;
- Avaliar o caso sem informação;
- Avaliar o caso com informação perfeita e calcular o valor da informação perfeita;
- Desenhar a árvore de decisão cronológica para informação imperfeita;
- Determinar a confiabilidade da informação a ser obtida, dado que a informação fornece um resultado: qual a probabilidade de a mesma estar correta?
- Aplicar o Teorema de Bayes;
- Calcular o valor da informação imperfeita.

Portella *et al.* [2003] aplicam a técnica desenvolvida por Floris *et al.* [2000] para a análise do valor da informação associado à técnica de planejamento de experimentos, sob condições de incerteza, para otimizar a exploração de um novo bloco em um campo de águas ultra-profundas, localizado na Bacia de Campos. As propriedades de maior impacto na incerteza volumétrica foram: a relação espessura porosa, a posição do contato água e óleo e a permeabilidade absoluta.

Inicialmente, foi construído um modelo em três dimensões do reservatório em um simulador de fluxo, considerando-se duas variáveis incertas e três níveis de incerteza. Foram, então, alocados 9 modelos na árvore de decisão. Posteriormente, foi feita uma comparação entre a produção acumulada de óleo provenientes da simulação numérica e da metodologia de superfície de resposta, mostrando-se similares. A partir daí, a árvore foi construída combinando a árvore de decisão com a simulação Monte Carlo. O parâmetro permeabilidade foi utilizado para realizar a simulação Monte Carlo. Para a combinação de cada cenário (nove no total), as curvas de produção oriundas da metodologia de superfície de resposta foram inseridas (uma para cada cenário de permeabilidade) e, para cada iteração de Monte Carlo, o software escolheu ao acaso uma das curvas para calcular o valor presente líquido do projeto. Comparando-se as árvores de decisão com e sem a informação, foi obtido um valor de informação de US\$ 43,94 milhões, no caso, maior que o custo de perfuração de um poço. Após a aquisição dos dados, outras informações também foram obtidas, como a localização do topo da estrutura e a saturação inicial de água, diferentes dos valores utilizados na simulação. Isto mostra que a obtenção de novas informações pode reduzir a incerteza de parâmetros – não somente dos extremamente críticos, como os classificados no problema, como também dos demais – e ser útil em um futuro estudo, obtendo uma melhor análise de incerteza.

Esta metodologia, assim como outras encontradas na literatura, pode ser aplicada a uma fase inicial na avaliação de campos, utilizando a árvore de decisão como critério utilizado de investir ou não investir no final dos ramos da árvore, ou seja, supondo que a informação foi obtida e um dos ramos resulte em VPL negativo, a opção sugerida pelo autor seria o não investimento no projeto. Entretanto, este critério apenas elimina cenários de VPL negativo do projeto, não usufruindo do uso da informação para alterar a estratégia de produção do campo em questão. Isso resulta claramente em sub-avaliação do valor da informação. Por exemplo, se todos os cenários tivessem VPL positivo, essas metodologias resultariam em VDI iguais a zero, enquanto que, se as estratégias adequadas fossem aplicadas aos cenários possíveis, a informação claramente traria valor ao processo.

Pode-se observar que, embora o conceito do VDI seja relativamente claro, a complexidade do processo inviabiliza a quantificação desse valor na prática. Não se encontrou na literatura um

trabalho com uma metodologia clara de cálculo do VDI para casos com diversos atributos incertos. O objetivo do presente trabalho é, portanto, de apresentar uma metodologia viável de quantificação do VDI para a fase de avaliação de campos de petróleo, através de simplificações do processo que tornam o cálculo possível, mantendo a confiabilidade no processo.

1.1.2 Valor da Flexibilização

Antes de se proceder à aquisição da informação, baseada no valor monetário esperado (VME) positivo do estudo do valor da informação, deve-se também determinar a possibilidade da flexibilização do projeto, ou seja, uma variação na estratégia de produção que esteja alocada entre os possíveis cenários (pessimistas, intermediários e otimistas).

Pode-se apresentar uma análise similar à do valor da informação, em que o objetivo agora é determinar se o benefício esperado da flexibilização supera seu custo, nomeado por Valor da Flexibilização.

Dezen *et al.* [2001] comparam duas metodologias de análise de projetos: a do Fluxo de Caixa Descontado (uma metodologia tradicional) e outra utilizando a teoria das Opções Reais. O valor da flexibilização é comparado a uma opção financeira em que ambos estão sujeitos a variações futuras.

Dezen *et al.* [2002] definem flexibilização como uma propriedade de um plano de desenvolvimento de um campo. A flexibilização permite que uma empresa mude o curso de um projeto quando novas informações são descobertas. Esta habilidade para reagir a informações inesperadas proporciona à gerência tomar decisões que beneficiarão o projeto.

A flexibilidade de se postergar um projeto permite realocar o investimento de capital em oportunidades de investimentos mais atrativos e de reavaliar o projeto em uma data posterior.

Begg *et al.* [2002] apresentam quatro circunstâncias em que a flexibilização pode ser empregada:

- Quando a aquisição da informação não é possível;
- Quando é mais barata do que a aquisição da informação;
- Para gerenciar a incerteza residual depois da aquisição da informação;
- Quando aumenta o valor do projeto.

Nos primeiros três itens, o objetivo é de minimizar os riscos (impactos negativos) associados com a incerteza e, no último item, é explorar a incerteza.

Os autores descrevem dois exemplos do uso da flexibilização no gerenciamento de incertezas. O primeiro lida com a eliminação do risco do suporte de um aquífero insuficiente para o desenvolvimento de um campo, seguido por outro exemplo relacionado à incerteza do volume de óleo originalmente *in situ* (VOOIS).

No primeiro exemplo, os autores ilustram o uso da flexibilização no gerenciamento da incerteza na possível presença de um grande aquífero que auxiliaria o desenvolvimento de um campo em águas profundas. Supondo que existem boas chances de o aquífero ser grande o suficiente para tornar desnecessária a implantação de um sistema de injeção de água, esta é a melhor estimativa, a qual resulta em VPL de US\$ 350 milhões. Entretanto, há 25% de chance de o aquífero ser médio e 15% de chance de ser pequeno, resultando em VPL 0 e US\$ –150 milhões, respectivamente. Para eliminar estas possibilidades, duas alternativas são consideradas: a primeira é incluir o sistema de injeção na plataforma; a segunda é construir uma plataforma com espaço e potencial suficientes para a colocação do sistema de injeção em uma data futura. Os custos associados às escolhas estão na Tabela 1.1 e os VPL e suas respectivas probabilidades de ocorrência, na Tabela 1.2.

Tabela 1.1. Custos associados às opções de investimento (Begg *et al.*, 2002).

Sistema de injeção pré-instalado [milhões US\$]	1000
Sem sistema de injeção [milhões US\$]	800
Plataforma flexível [milhões US\$]	860
Colocação do sistema de injeção [milhões US\$]	160

Tabela 1.2. VPL e probabilidades de ocorrência para cada cenário possível (Begg *et al.*, 2002).

Probabilidades de ocorrência		Aqüífero		
		Grande	Médio	Pequeno
		60%	25%	15%
VPL [milhões US\$]	Com injeção de água	200	150	100
	Sem injeção de água	350	0	-150
	Injeção flexível	290	130	80

Se o aqüífero for grande, o cenário determinístico sem injeção de água terá o maior VPL. O cenário caracterizado pela plataforma flexível terá o segundo maior VPL, com uma perda de 60 milhões de dólares, devido ao custo da flexibilização. Entretanto, se o aqüífero for médio ou pequeno, o cenário com sistema de injeção terá o maior VPL, seguido pelo cenário com flexibilização, que custa mais devido à instalação do sistema de injeção em data futura, quando a plataforma já está em produção. Para determinar a melhor decisão, pode-se visualizar a árvore de decisão na Figura 1.2².

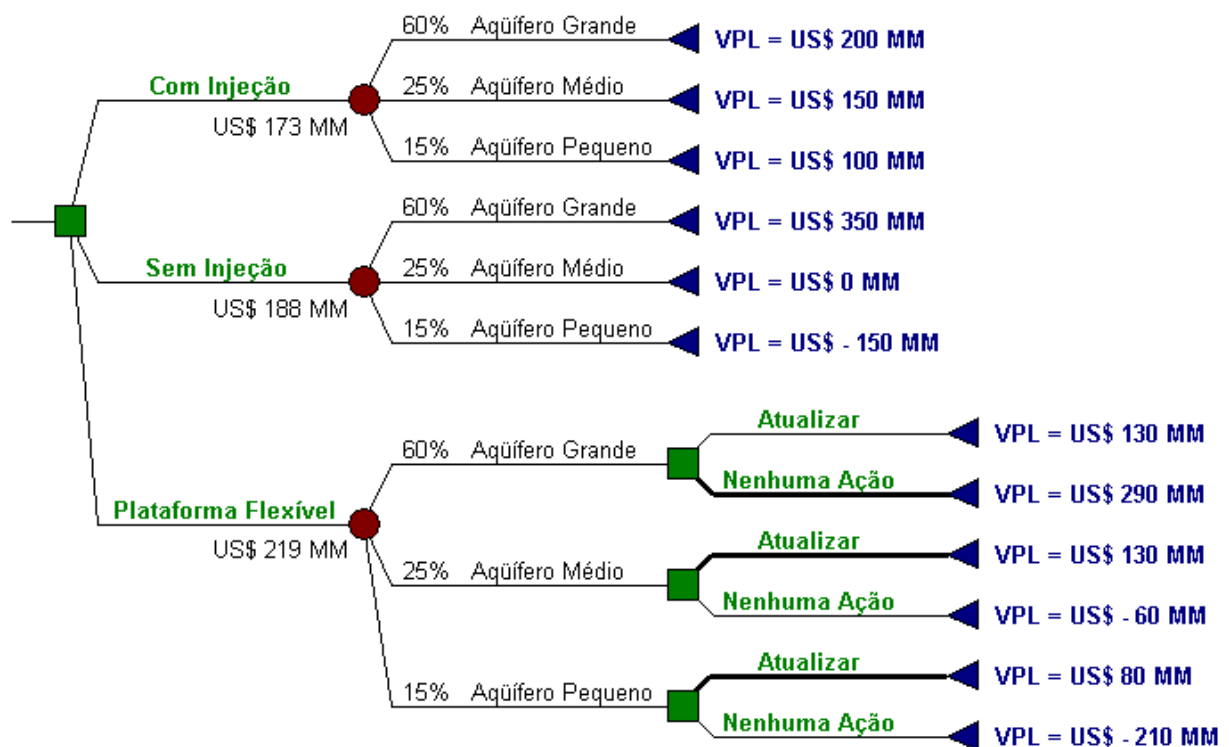


Figura 1.2. Cálculo da flexibilização do sistema de injeção.

² Neste trabalho, este tipo de diagrama utiliza a padronização em que o quadrado simboliza a tomada de decisão, e o círculo, a ocorrência de um evento.

O valor monetário esperado do sistema de injeção pré-instalado é menor do que o do cenário sem sistema de injeção, e não justificável economicamente. A melhor escolha é a instalação da plataforma flexível, que tem como opção instalar o sistema de injeção posteriormente, caso haja necessidade, resultando em VME 31 milhões de dólares maior que a melhor alternativa (caso sem injeção).

No segundo exemplo, o autor ilustra a eliminação do risco através da flexibilização para extrair valor a partir da incerteza, assumindo que um estudo sísmico foi realizado após o cálculo do valor da informação. A incerteza com relação ao VOOIS foi determinada em uma escala média, mas ainda existe uma incerteza residual, ou seja, médio-grande, médio-médio e médio-pequeno. Foi decidido desenvolver o campo com uma única plataforma, e as opções são:

- Plataforma tamanho médio, baseada na melhor estimativa do VOOIS – equivalente à escolha determinística que ignora a incerteza remanescente;
- Plataforma tamanho grande, que pode comportar o cenário em que o VOOIS é grande;
- Plataforma flexível, inicialmente com mesma capacidade que a plataforma tamanho médio, mas que é projetada para a possibilidade de expansão, ou seja, adição de poços e capacidade de processamento extra, caso ocorra o cenário em que o VOOIS é grande.

Os custos são mostrados na Tabela 1.3 e os VPL, probabilidades de ocorrência e taxas máximas de produção são mostrados na Tabela 1.4.

Tabela 1.3. Custos dos sistemas de produção (Begg *et al.*, 2002).

Plataforma tamanho grande [milhões US\$]	400
Plataforma tamanho médio	300
Plataforma flexível	330
Custo de expansão	90

A expansão somente irá ocorrer se o real VOOIS for médio-grande. Neste caso, o VPL da opção com plataforma flexível é US\$ 280 milhões maior do que com a plataforma tamanho médio, mas US\$ 20 milhões menor do que com a plataforma tamanho grande, devido à atualização do dinheiro no tempo e custos adicionais na construção de dois estágios. Se o real VOOIS é médio-médio, o VPL para a plataforma flexível é US\$ 30 milhões menor do que com a

plataforma média, devido ao custo do não uso da flexibilização, mas US\$ 70 milhões maior do que com a plataforma grande. Se o real VOOIS é pequeno, os VPL refletem todos os casos de super dimensionamento. Para determinar a escolha da melhor plataforma, constrói-se a árvore de decisão, como mostra a Figura 1.3.

Tabela 1.4. VPL, probabilidades de ocorrência e taxas de produção (Begg *et al.*, 2002).

		VOOIS		
		Médio-Grande	Médio-Médio	Médio-Pequeno
Probabilidades		30%	40%	30%
Taxas [10 ³ bl/dia]	Plataforma grande	100	60	40
	Plataforma média	60	60	40
	Plataforma flexível	100	60	40
VPL [milhões US\$]	Plataforma grande	600	200	0
	Plataforma média	300	300	100
	Plataforma flexível	580	270	70

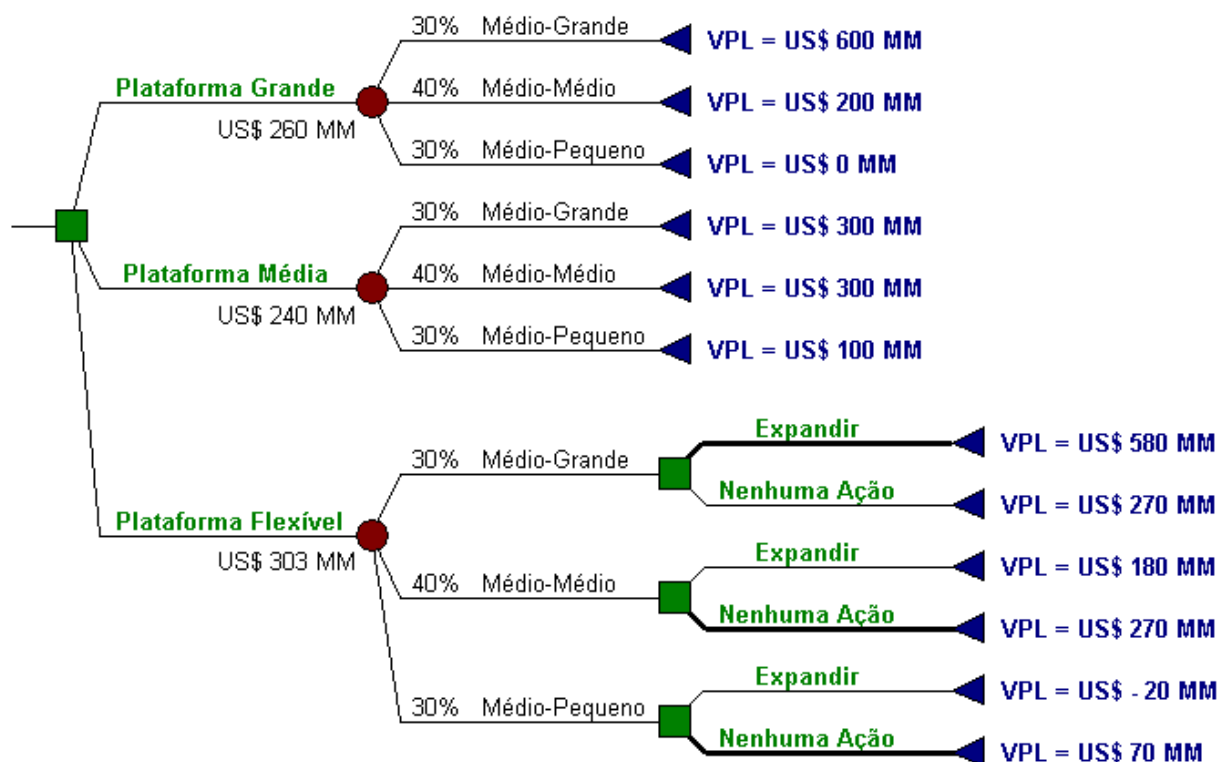


Figura 1.3. Flexibilização do sistema de produção.

Pode-se observar que a opção com a plataforma grande é melhor do que a opção com a plataforma média. Entretanto, a plataforma flexível é a melhor opção com um VME 63 milhões maior do que a opção com a plataforma média.

Gerenciar incertezas é mais do que eliminar ou reduzir o risco. A utilização da flexibilização em um projeto oferece a oportunidade para agregar valor ao projeto, e o valor da mesma aumenta com o aumento da incerteza, como mostra a Figura 1.4.

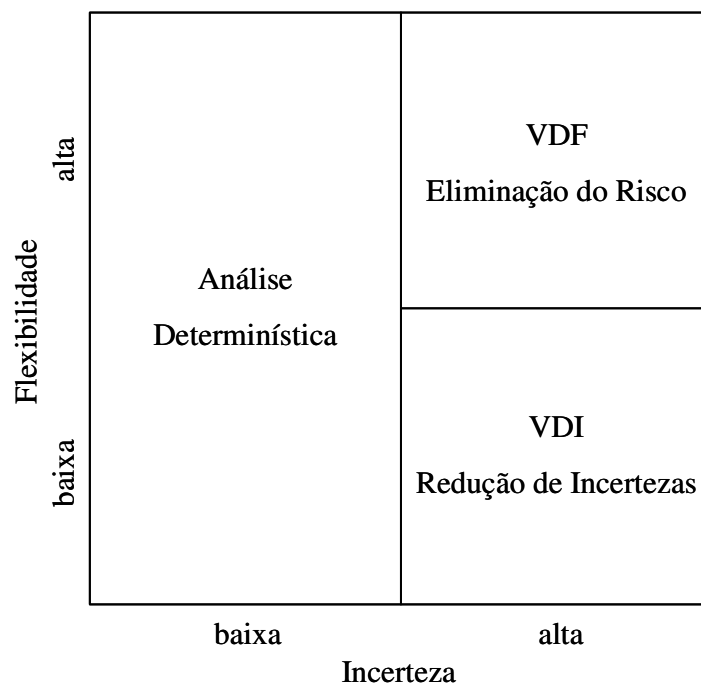


Figura 1.4. Situação em que o VDI, o VDF e a análise determinística são apropriados (Begg *et al.*, 2002).

Se a incerteza existe, o que é verdade na maioria das oportunidades de investimento, a flexibilização sempre agregará valor ao projeto, se não houver custos ou se for mais barato do que outras alternativas. Se há um custo que é análogo ao custo de uma opção financeira, este deve ser ponderado com seus benefícios.

Iatchuk [2004] afirma que a flexibilização de alguns projetos possui algumas complicações. Por exemplo, após a definição do sistema de produção marítimo, a flexibilidade para a introdução de alterações, como a inclusão de novos poços, é pequena. As dificuldades estão associadas à

pequena disponibilidade de espaço no convés das plataformas, às limitações de carga da estrutura e à arquitetura do arranjo submarino. Outros fatores indesejáveis do ponto de vista operacional são: o aumento na capacidade de processamento, a adição de novos *risers* e o lançamento de novas linhas de escoamento.

Uma vez implantado o projeto, pode haver sérias implicações quando se altera o número de poços: o aumento na capacidade de processamento de óleo, da injeção de água ou gás, da compressão de gás, do tratamento da água injetada ou produzida, entre outras. Caso um estudo mais abrangente sobre a flexibilização do número de poços em projetos no mar (*offshore*) seja feito, deve-se levar em consideração inúmeros cenários, utilizando-se também plataformas Fixas, Semi-Submersíveis, FPSO, TLP, SPAR, etc.

Por esta menor flexibilidade em campos marítimos, a quantificação mais precisa do valor da informação assume importância maior, pois a definição de estratégias pouco flexíveis para casos com grandes incertezas passa a ter risco maior.

Um fato importante que deve ser levado em consideração é a flexibilização de sistemas de produção em terra, que são mais versáteis e acessíveis se comparados aos sistemas marítimos de produção, proporcionando ao sistema produtivo mais flexibilidade posteriormente à sua definição ou implantação. Esta flexibilidade está relacionada à adição de poços produtores e injetores, ao aumento da capacidade de produção e injeção de fluidos, à introdução de novos equipamentos e a um melhor dimensionamento da área explorada em questão.

1.2 Motivação

A análise do valor da informação tem-se destacado atualmente nos processos de análise e tomada de decisão, demonstrando grande potencial tanto na fase de exploração quanto nas fases de avaliação e desenvolvimento, principalmente no desenvolvimento de:

- Campos marítimos que apresentam menor flexibilidade de mudanças;

- Campos marginalmente econômicos, em que cada investimento possui grande importância e influência no fluxo de caixa e no VPL do projeto, ou seja, a falta ou o excesso de informações obtidas em projetos de E&P tem forte impacto em seu retorno.
- Apesar de o conceito do valor da informação ser bem difundido, ele não foi largamente aplicado, devido à complexidade e tempo exigidos em determinados casos, devendo ser investigado com mais detalhes, com o intuito de explorar o potencial desta ferramenta extremamente importante na análise e também na viabilização de projetos na indústria de petróleo.

Além disso, a dificuldade no cálculo do valor da informação está diretamente relacionada com a complexidade do problema, ou seja, em casos em que simplificações não são aconselhadas, uma nova metodologia torna-se necessária.

1.3 Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação podem ser subdivididos basicamente em três partes:

- Revisar e esclarecer os conceitos e aplicações do valor da informação e de flexibilização em projetos no desenvolvimento de campos de petróleo;
- Elaborar uma metodologia detalhada de análise e cálculo do valor da informação como uma ferramenta de auxílio ao processo de tomada de decisões durante as fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo;
- Aplicar a metodologia proposta tanto em casos simples quanto em casos mais complexos, com maior número de variáveis incertas, considerando a obtenção de informações completas e incompletas, em que a análise do VDI torna-se complicada.

Outros objetivos do trabalho são: explorar a metodologia de análise de risco, amadurecer e desenvolver a utilização do conceito dos modelos geológicos representativos³, estudando o

³ Modelos geológicos representativos foram introduzidos por Schiozer *et al.* [2004] para simplificar o processo de análise de risco e estão sendo utilizados neste trabalho, sendo definido nos próximos capítulos.

impacto destas simplificações, que auxiliam e viabilizam o cálculo do valor da informação. Embora em várias partes do texto estejam sendo apresentados os conceitos de VDI e VDF, o foco principal do trabalho é a quantificação do VDI, pois o VDF ainda necessitaria de um estudo mais completo dos tipos de flexibilidades possíveis de serem introduzidos em cada caso estudado.

1.4 Organização da dissertação

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No Capítulo 1 foi elaborada uma breve introdução, seguida pelas revisões bibliográficas do valor de informação e flexibilização. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão dos principais conceitos e fundamentos teóricos relevantes para o entendimento do trabalho proposto, como: a metodologia de análise de risco, o conceito de modelos representativos, a elaboração da árvore de derivação e decisão, uma análise econômica, o teorema de Bayes e a definição de informação completa e incompleta.

No Capítulo 3, apresenta-se o desenvolvimento da metodologia, com a descrição das principais etapas, empregando a técnica proposta neste trabalho em três exemplos, dentre eles dois casos teóricos e didáticos, visando explicitar os conceitos do valor da informação e da flexibilização, e um caso representando a avaliação e desenvolvimento de um campo petrolífero real modificado, visando aplicar a metodologia passo a passo.

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos no presente estudo. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e contribuições desta dissertação e também propõe algumas recomendações para pesquisas futuras.

Capítulo 2

Conceitos - Fundamentação Teórica

Este capítulo tem como objetivo introduzir os principais conceitos necessários para o entendimento e composição do processo de cálculo e análise do valor da informação. Dentre os itens, os principais correspondem à metodologia de análise de risco, à utilização de modelos representativos, à essência do valor da informação completa e incompleta, às análises de decisão e econômica e, por último, às árvores de decisão e derivação.

2.1 Análises de Incerteza e Risco

Os conceitos de incerteza e risco são muitas vezes aplicados no processo de análise de decisão de projetos. Embora na prática eles sejam usados como sinônimos ou erroneamente confundidos, têm significados distintos.

Segundo Stermole e Stermole [1974], o termo incerteza é usado para se referir à possível variação nos parâmetros que afetam a avaliação de investimento. Risco refere-se à avaliação de um investimento usando um mecanismo conhecido que incorpore as probabilidades de ocorrência de sucesso ou falha e diferentes valores de parâmetros de investimento. Ambos, incerteza e risco, influenciam quase todos os tipos de decisões de investimento, especialmente investimentos envolvendo pesquisa e desenvolvimento para qualquer indústria e para a exploração de minérios, óleo e gás.

Rose [2001] denomina o risco como a ameaça de perda. Decisões de risco ponderam o nível de investimento levando-se em conta quatro fatores: o valor financeiro líquido, a chance de sucesso ou fracasso, o potencial de ganho e o potencial de perda. As últimas três considerações são baseadas em estimativas, feitas sob incerteza.

Groebner e Shannon [1993] definem incerteza como a impossibilidade de prever resultados. Pode-se especificar os possíveis resultados para cada alternativa de decisão, mas não se pode conhecer o exato resultado de um caminho qualquer a ser tomado.

Já para projetos de exploração, o risco é uma medida de desvio nos valores esperados para o fluxo de caixa [Gentry e O'Neil, 1984]. Vários fatores fornecem a incerteza, como custos de operação, quantidade de reservas, preço do produto, etc.

Embora seja muito variado e discutido, o conceito de incerteza utilizado neste trabalho corresponde a uma grandeza associada à falta de conhecimento de atributos, sejam estes geológicos, tecnológicos ou econômicos, cujos valores não podem ser obtidos de maneira precisa. A incerteza dos atributos causa incerteza também na previsão de produção. A associação da incerteza de produção associada ao retorno financeiro dos projetos e ao processo decisório, por exemplo, de definição de estratégia de produção, resulta na quantificação do risco.

As diversas dificuldades nas descobertas de jazidas de hidrocarbonetos estimularam o início do uso de ferramentas de análise de risco já na década de 1960. Embora esta análise não garanta o êxito de uma decisão, o seu uso sistemático apresenta muitas vantagens, dentre elas a quantificação de perdas e o desenvolvimento sub-ótimo quando o desempenho de um campo difere de sua expectativa.

No princípio, a análise de risco foi utilizada na fase de exploração, com a finalidade de avaliar o risco e sua probabilidade de sucesso exploratório, além de quantificar os possíveis volumes originais *in situ*. Com o aumento dos custos em geral e a necessidade de explorar áreas remotas e horizontes cada vez mais profundos, a abordagem da análise de risco tem sido

difundida também na fase de desenvolvimento de campos, porque nesta fase estão inseridos os maiores investimentos no projeto.

Demirmen [2001] define três tipos de risco (Figura 2.1) no desenvolvimento de um campo de petróleo, que devem ser considerados no processo de decisão: (1) a perda de oportunidade, que ocorre quando um prospecto é abandonado porque foi considerado inviável economicamente e, no entanto, é viável; (2) o desenvolvimento inviável economicamente, que ocorre quando é considerado viável economicamente e, no entanto, é inviável; e (3) o desenvolvimento não otimizado, que ocorre quando o desenvolvimento do campo foi subestimado ou superestimado em sua capacidade de produção e infra-estrutura.



Figura 2.1. Relação da avaliação do risco e VPL do projeto (Demirmen, 2001).

O risco é uma função de incertezas, principalmente (1) geológicas, (2) econômicas e (3) tecnológicas, que podem ser integradas, como mostra a Figura 2.2. Entretanto, a avaliação do risco não é só afetada por estas incertezas. A estimativa do risco é também afetada pelo modelo da estratégia de produção e pelo gerenciamento do processo de decisão, especialmente para análise de reservatórios complexos que exigem um nível de detalhamento na estimativa da produção somente obtida pela simulação numérica ou técnicas similares.

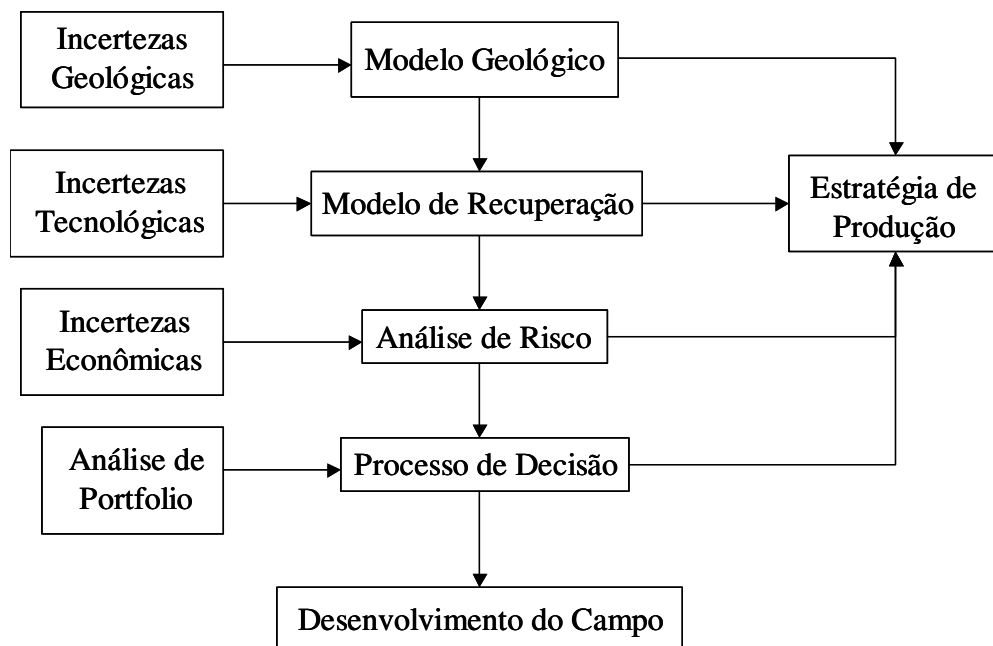


Figura 2.2. Integração das incertezas na Análise de Risco (Schiozer *et al.*, 2004).

A metodologia de análise de risco, que será aplicada inicialmente nesta tese, foi desenvolvida primeiramente por Loschiavo [1999], sofrendo uma evolução nos trabalhos de Steagall [2000] e Santos [2002]. Baseia-se na simulação de diversos modelos de fluxo que representam os possíveis cenários do reservatório, através da combinação dos atributos incertos que o caracterizam. As principais etapas desta metodologia são:

- Tratamento de incertezas existentes, com a definição dos atributos de reservatório tidos como incertos, seus valores e probabilidades de ocorrência associadas;
- Definição dos atributos mais críticos, através de uma análise de sensibilidade parâmetro a parâmetro, a partir do modelo de reservatório mais provável;
- Simulação de todos os modelos probabilísticos possíveis, obtidos da combinação dos atributos críticos, e cálculo da função objetivo para cada modelo. Na montagem dos modelos de simulação, os atributos críticos são tratados como independentes entre si. A função objetivo escolhida para este trabalho foi o Valor Presente Líquido (VPL).
- Obtenção da curva de risco do projeto, através da tabulação dos resultados de VPL contra probabilidades de ocorrência acumuladas;
- Obtenção de modelos de simulação representativos das variabilidades geológicas de recuperação e VPL através de gráfico especializado.

A Figura 2.3 mostra o fluxograma do processo de análise de risco. Uma descrição mais detalhada desta metodologia é demonstrada nos próximos itens.

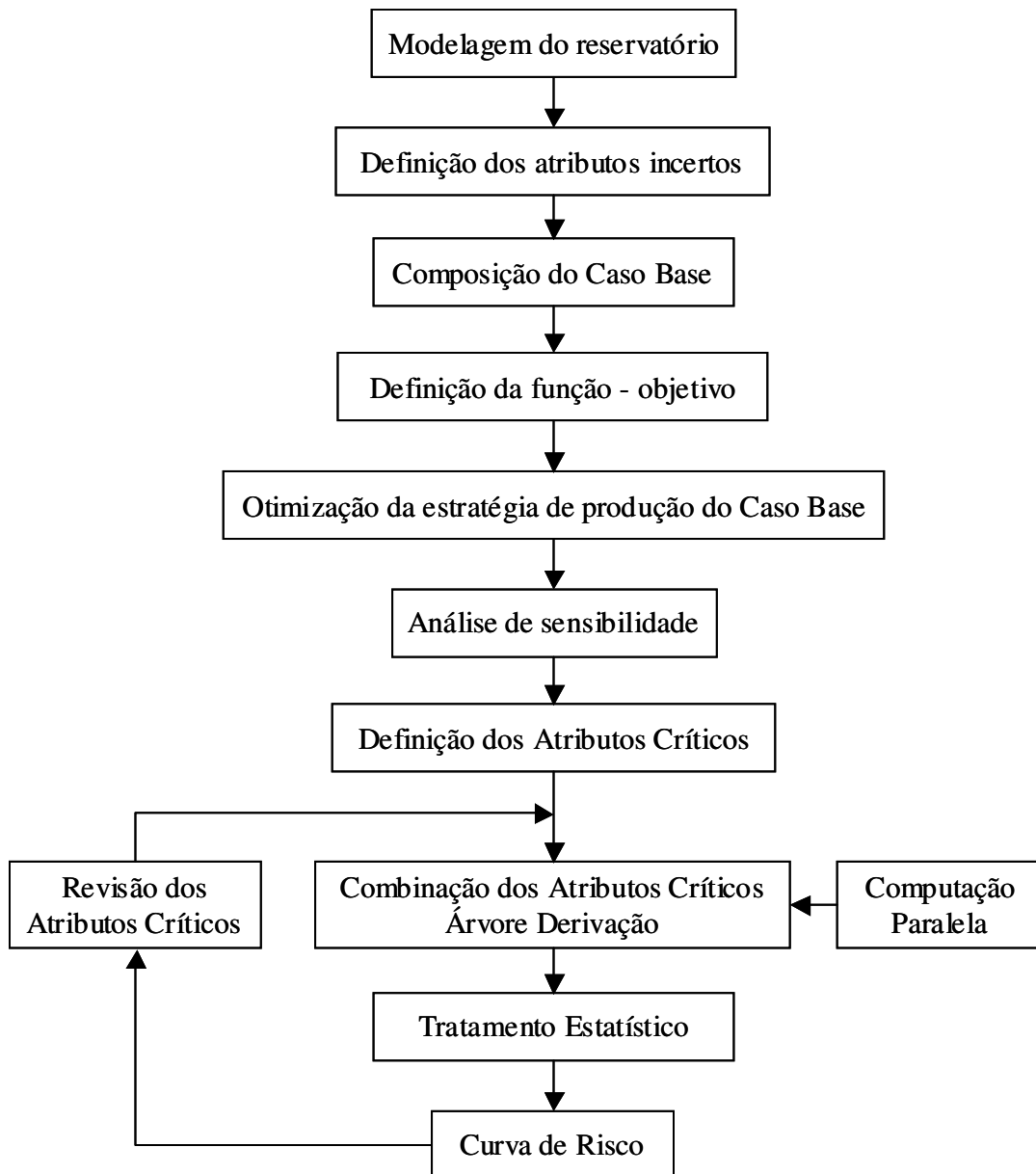


Figura 2.3. Fluxograma do processo de análise de risco.

O processo de análise de risco explicitado acima usufrui do método das árvores de decisão, um dos possíveis dentre outros. Esta análise também pode ser realizada através da simulação Monte Carlo e da Teoria das Opções Reais.

Galli *et al.* [1999] compara três métodos usados para avaliar projetos na indústria do petróleo: opções reais, árvore de decisão e simulação Monte Carlo. O método das opções reais é proveniente do mercado financeiro, e incorpora o modelo “*Black and Scholes*” para a variável preço e expressa o valor do projeto como uma equação diferencial estocástica. As árvores de decisão se originam de pesquisas operacionais e da teoria dos jogos, negligenciando as variações do preço no tempo, concentrado na estimativa das probabilidades dos possíveis valores do projeto, utilizando às vezes a Teoria de Bayes. De maneira simples, a simulação Monte Carlo somente requer a especificação das distribuições de probabilidades de todos os parâmetros pertencentes à equação do VPL. Distribuições estatísticas padrões, como as distribuições normal, lognormal, triangular e uniforme, são escolhidas para representar a variabilidade de cada parâmetro. Em muitos casos, as variáveis são assumidas mutuamente independentes, para simplificar os cálculos. Alguns valores são selecionados de cada parâmetro de forma randômica para cada ano e substituídos na equação para obter um possível valor de VPL. Esta operação é repetida centenas ou milhares de vezes, resultando em um histograma de possíveis projetos.

O autor compara a simulação Monte Carlo e a árvore de decisão, do ponto de vista matemático, afirmando que a árvore de decisão é um método que avalia o maior VPL esperado dentre diversos nós de decisão, em oposição à simulação Monte Carlo, que calcula o VPL esperado para um cenário específico. No entanto, ao contrário da simulação Monte Carlo, a árvore de decisão não gera o histograma dos possíveis VPL. Esse parece ser o preço por incorporar a opção de decisão. Ambos os métodos usam a tradicional taxa de desconto para levar em consideração o valor do dinheiro no tempo, e ambos também possuem problemas em lidar com as variáveis correlatas. O terceiro método, das opções reais, abandona a taxa de desconto e a substitui pela taxa livre de risco, um conceito oriundo do mercado financeiro.

Segundo o autor, existem três principais fontes de divergência entre os três métodos: (1) o modo como eles lidam com o valor do dinheiro no tempo, (2) como a incerteza está disposta em cada parâmetro, e (3) se eles incorporam a flexibilidade gerencial.

A simulação Monte Carlo padrão foca a modelagem da incerteza nos valores dos parâmetros analisados, e em geral ignora a flexibilidade gerencial. Em contraste a isso, a árvore

de decisão analisa diferentes estratégias, escolhendo a que maximiza o VPL esperado. Por último, a teoria das opções engloba a variação do dinheiro no tempo, mas não incorpora informações técnicas, ou seja, não considera variações na estratégia de produção, que também são importantes na análise.

2.1.1 Tratamento de incertezas

Dependendo do estágio em que o projeto se encontra nas fases de avaliação e desenvolvimento, existem diferentes níveis de incerteza associados ao mesmo. Por exemplo, no início destas fases, a quantidade de informações obtidas até então é pequena, e a incerteza é maior.

A identificação dos atributos em que existe a presença de incertezas e o conseqüente estabelecimento da curva de probabilidade de ocorrência cabe aos especialistas, geólogos e engenheiros envolvidos na avaliação do reservatório.

Para o caso da análise através da árvore de decisão, cada atributo contínuo é discretizado em níveis de incerteza associados a probabilidades de ocorrência (Figura 2.4 e Figura 2.5). Segundo Jensen [1998], Salomão e Grell [2001] apud Santos [2002], devido ao grande esforço computacional que pode resultar de um número grande de níveis, é usual a adoção de três níveis, representando o maior (otimista), o menor (pessimista) e o provável (intermediário) valor. Esses valores podem, se necessário, ser definidos de maneira direta pela multiplicação, divisão ou translação do valor mais provável.

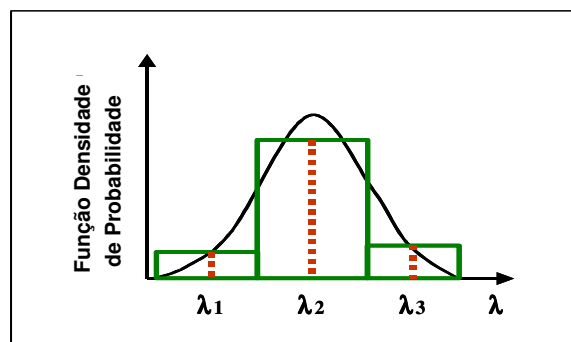


Figura 2.4. Exemplo de função densidade de probabilidade discretizada em três níveis.

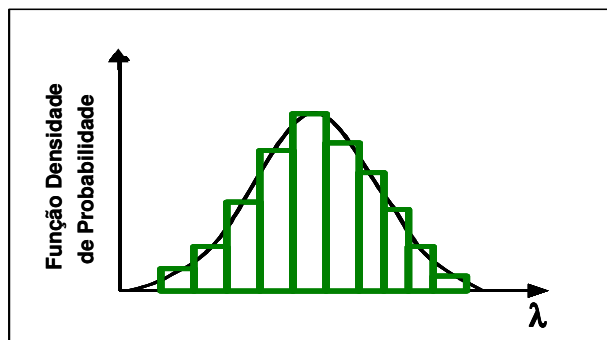


Figura 2.5. Exemplo de função densidade de probabilidade discretizada em vários níveis.

Para atributos que se caracterizam por uma distribuição discreta de probabilidades, o número de níveis de incerteza a serem adotados é definido pela quantidade de análises confiáveis e representativas disponíveis. Nestes casos, pode não ser possível definir quais são os níveis otimista e pessimista sem o uso da simulação de fluxo. Exemplos de possíveis variáveis discretas são: análise PVT, imagens de determinada propriedade e curvas de permeabilidade relativa.

Comparando-se os métodos da árvore de decisão e Monte Carlo com relação ao tratamento de incertezas, o método da árvore de decisão é caracterizado por discretizar a variação de cada parâmetro em níveis, realizando a combinação de todos os cenários através da árvore de derivação. Em contrapartida, o método de Monte Carlo necessita de um número relativamente grande de simulações a serem realizadas para tornar o processo confiável a ponto de se aproximar ao máximo das distribuições de cada parâmetro analisado. Desse modo, a análise por este método torna-se inviável para o cálculo do valor da informação, devido ao elevado número de simulações necessárias, considerando o tempo despendido para cada simulação em um simulador de fluxo e também o processo de otimização. O processo de análise de risco através de Monte Carlo pode ser possível se o processo de modelagem do reservatório for simplificado, por exemplo, através da substituição do simulador numérico por uma superfície de resposta, como mostra Dejean *et al.* [1999]. Entretanto, o cálculo do valor de informação, como será apresentado posteriormente, necessita da avaliação do impacto de mudanças da estratégia de produção, de maneira que esse passo pode não ter confiabilidade suficiente se métodos muito simplificados de modelagem forem aplicados. Dessa forma, neste trabalho, foi utilizado o conceito de árvore de derivação.

2.1.2 Composição do Caso Base

Um modelo do reservatório a ser estudado deve ser formulado, definindo-se uma estratégia de produção inicial mais adequada, de forma que seja um modelo utilizado como referência para a posterior análise de sensibilidade. Este modelo deve ser constituído pelo conjunto de todos os níveis mais prováveis dos atributos incertos e é aqui nomeado de Modelo Base ou Caso Base.

2.1.3 Otimização da estratégia para o Caso Base

O processo de otimização utilizado no modelo base e dos demais modelos apresentados neste trabalho seguem a metodologia proposta por Santos [2002]. O procedimento adotado sugere a escolha de ações que são capazes de melhorar o VPL do projeto quando aplicado ao modelo de simulação. Essas ações estão explicitadas abaixo:

- a) Remover poços produtores que apresentem VPL negativo;
- b) Reordenar cronograma de entrada em operação a partir do VPL individual dos poços;
- c) Avaliar a possibilidade de re-alocação de poços produtores ou injetores;
- d) Remover os injetores menos importantes;
- e) Desativar canhoneiros com produção de óleo desprezível;
- f) Remover produtores de menor expressão;
- g) Converter produtores em injetores.⁴

Se, ao aplicar um passo, ocorrer ganho no valor da função objetivo, a modificação é preservada no modelo de simulação e o passo seguinte é executado. Caso contrário, o modelo é mantido e o passo seguinte executado. Como forma de maximizar a otimização, cada modelo é submetido ao conjunto de passos de otimização uma segunda vez, ao fim da qual considera-se que a otimização foi concluída. A aplicação de uma terceira ou quarta rodada é considerada desnecessária, dado que, conforme testes efetuados, os ganhos passam a ser progressivamente menores e pouco significativos.

⁴ Os Itens e) e g) não foram utilizados neste trabalho, para tornar o processo de otimização mais simplificado.

2.1.4 Análise de Sensibilidade

Grant e Ireson [1970] afirmam que a sensibilidade diz respeito à magnitude da mudança em um ou mais elementos de um problema de economia que poderá inverter uma decisão com várias alternativas. Assim, se um parâmetro pode ser alterado, sob uma série de valores, sem afetar a decisão final, esta decisão não é sensível às incertezas, levando-se em conta este elemento. Por outro lado, se uma pequena mudança na estimativa de um elemento alterar a decisão, esta é considerada muito sensível a mudanças no referido elemento.

Santos [1988] comenta que, no estudo de viabilidade econômica, a análise de sensibilidade consiste em fazer variar um ou mais parâmetros que envolvem o projeto e comparar com a correspondente variação no resultado. Deve-se dar mais atenção aos elementos para os quais o resultado é mais sensível.

Portanto, pode-se considerar que a análise de sensibilidade é um meio de avaliar os efeitos da incerteza no investimento, determinando-se como a lucratividade do investimento varia conforme são variados os parâmetros que afetam o resultado da avaliação econômica. Em outras palavras, a análise de sensibilidade é uma ferramenta para identificar as variáveis que, quando alteradas, podem afetar consideravelmente a decisão [Stermole e Stermole, 1974].

Em resumo, a análise de sensibilidade é utilizada para reduzir o número de modelos possíveis a um patamar aceitável, permitindo que cada um dos valores de cada atributo incerto seja classificado, segundo sua relevância no desempenho do reservatório, em crítico ou não crítico. Assume-se que os níveis não críticos possam ser eliminados sem prejuízo da qualidade da análise de risco do projeto. Os atributos incertos críticos passam, então, a representar toda a incerteza presente no projeto. O ganho da análise de sensibilidade é a redução do número total de modelos a simular, decorrente do menor número de variáveis a combinar.

2.1.5 Simulação dos modelos do reservatório

Após a análise de sensibilidade, os atributos que sofreram eliminação de níveis devem ter as probabilidades de seus valores remanescentes redistribuídas [Costa, 2003]. São então gerados todos os modelos de simulação possíveis com a combinação de todos os níveis dos atributos críticos. Cada um desses modelos tem sua probabilidade de ocorrência calculada a partir das probabilidades individuais dos níveis usados na sua construção:

$$P_{\text{modelo}} = P_{\text{nível 1}} \times P_{\text{nível 2}} \times P_{\text{nível 3}} \times \dots \quad (2.1)$$

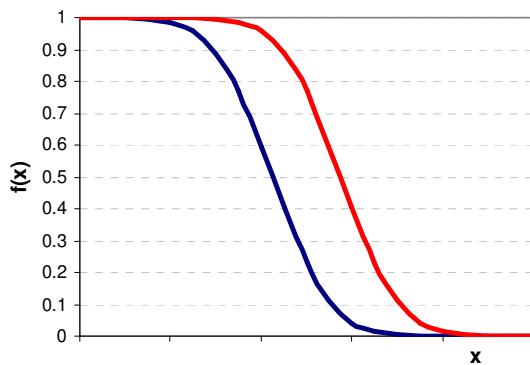
e também

$$\sum P_{\text{modelo}} = 1 \quad (2.2)$$

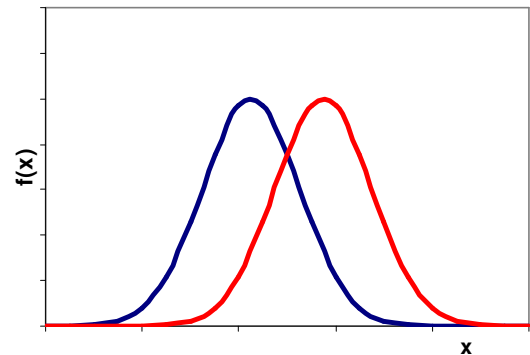
Todos os modelos são, então, submetidos ao simulador numérico e geradas as respectivas curvas de fluidos produzidos e injetados. Utilizando um programa, os VPL são calculados para cada modelo, em que cada VPL possui uma probabilidade de ocorrência do modelo que o gerou.

2.1.6 Curva de Risco do Projeto

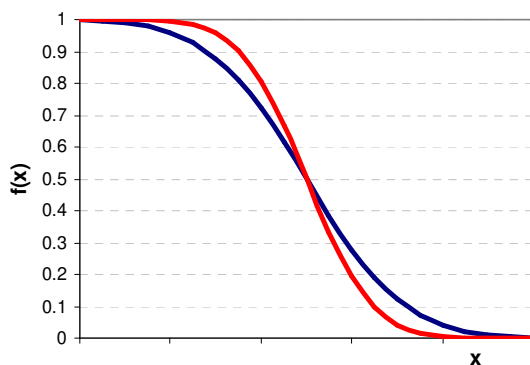
Os valores da função objetivo calculados são dispostos em ordem decrescente em paralelo com as probabilidades acumuladas. Após isto, a curva de risco da função escolhida é construída para um determinado período de produção. Exemplos desta curva podem ser visualizados na Figura 2.6, considerando a função objetivo $f(x)$.



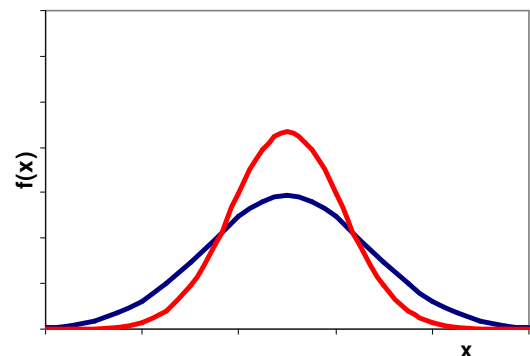
(a) Curvas de risco, maior VE (vermelho), menor VE (azul).



(b) Distribuições normais, equivalentes ao Item (a).



(c) Curvas de risco, menor risco (vermelho), maior risco (azul).



(d) Distribuições normais, equivalentes ao Item (c).

Figura 2.6. Curvas de risco hipotéticas.

A verificação e avaliação do risco agregado ao projeto pode ser realizada através da função objetivo, visualizando-se os percentis P10, P50 e P90 de probabilidade de ocorrência. Observando a Figura 2.6 Item (c), pode-se afirmar que a diferença entre os percentis P10 e P90 com relação à curva (azul) possui maior variação do que a curva (vermelha) e, conseqüentemente, um maior risco associado ao projeto. O Item (d) corresponde às respectivas curvas normais de cada projeto em que a curva azul possui um desvio-padrão (σ) maior que a curva vermelha, considerando a mesma média (μ). Além disso, com relação ao deslocamento das curvas sobre o eixo x, pode-se afirmar que a curva (vermelha) no Item (a) possui um maior valor

esperado (VE) da função objetivo do que a curva azul, considerando as mesmas probabilidades de ocorrência. Por exemplo, se a função objetivo considerada fosse o VPL, a curva vermelha possuiria maiores retornos, se comparada com a curva azul. Já o Item (b) mostra as curvas correspondentes ao Item (a), ou seja, as distribuições normais de probabilidades com diferentes médias (μ) e mesmo desvio-padrão (σ).

2.1.7 Escolha dos Modelos Representativos

Com o aumento do número de atributos críticos e de seus respectivos níveis de probabilidade de ocorrência, torna-se inviável a otimização de cada modelo utilizado na árvore de decisão, modificando-se sua estratégia de produção e maximizando seu respectivo VPL ou outra função objetivo. A partir deste fato, optou-se por seguir a metodologia de escolha de alguns modelos chamados de representativos para cobrir a variabilidade de modelos geológicos gerados no processo e que pudessem ser utilizados para o cálculo aproximado do VDI. O grau de aproximação e dependência desses modelos é um dos aspectos estudados neste trabalho.

2.2 Modelos Representativos

Steagall [2001] apresenta, como um dos objetivos de seu trabalho, a verificação da existência de modelos, obtidos pela combinação dos atributos, que possam representar os modelos otimistas, médios e pessimistas e estudar a diferença de comportamento de produção entre eles.

Nesta metodologia, mais de um modelo, próximos aos percentis P10, P50 e P90, podem ser escolhidos como otimista, médio ou pessimista, respectivamente, devido à existência de muitos modelos que podem ser representativos em relação às incertezas do reservatório. Desta forma, duas questões são levantadas no trabalho: “existem modelos representativos para os casos otimista, médio e pessimista do reservatório, definidos através de um percentil para a função objetivo analisada e que serviria para os estudos adicionais do desenvolvimento do campo? Não existindo um único modelo para cada caso, existiria algum critério para escolha dos modelos?”.

Para o caso estudado, não existe um modelo único que possa representar os modelos com incertezas pessimistas, médias e otimistas [Steagall, 2001]. Para investigar quais modelos podem ser escolhidos como representativos, é apresentado um estudo na tentativa de escolha destes modelos para a função objetivo VPL. A escolha do modelo otimista foi feita considerando os modelos que obtiveram resultados próximos do percentil P10, e para os modelos médio e pessimista considerou-se os valores próximos aos percentis P50 e P90, respectivamente.

Santos [2002] utiliza o conceito de modelos representativos como “um subsídio à tomada de decisão por permitirem, por exemplo, dimensionamento de instalações de produção, detalhamento posterior dos planos de desenvolvimento e avaliar a flexibilidade entre esses planos para cada uma das expectativas de realização”.

Costa [2003] também utiliza o conceito de modelos representativos e afirma que a adoção destes modelos na representação das incertezas geológicas e integração das mesmas com as demais incertezas é uma forma de reduzir o tempo e o esforço requerido no processo, viabilizando significativamente a análise.

Schiozer *et al.* [2004] empregam o conceito de modelos representativos na quantificação de incertezas geológicas, aplicando a integração desses modelos com a incerteza relativa à escolha da estratégia de produção na otimização desses modelos, para uma posterior integração com as incertezas econômicas e tecnológicas. Os resultados mostram que a integração desses modelos com a estratégia de produção aumenta a viabilidade do processo, reduzindo significativamente o número de simulações envolvidas e o esforço computacional do processo.

A utilização destes modelos tem como intuito utilizar poucos modelos com diferentes características das funções objetivo. A seleção de modelos representativos pode estar baseada nas funções objetivo, como valor presente líquido (VPL), produção de óleo (N_p), fator de recuperação (FR) e produção de água (W_p). O critério de seleção é a escolha de modelos com diferenças significantes no fator de recuperação (FR) que estão próximos de P10, P50 e P90 do valor presente líquido (garantindo também uma grande variação no N_p e W_p). Em exemplos testados no trabalho, foram utilizados até 9 modelos representativos.

O critério de escolha destes modelos representativos aplicados a este trabalho difere um pouco dos apresentados acima, de forma que serão discutidos na metodologia proposta no Capítulo 3.

2.3 Valor da Informação

A análise do valor da informação (VDI) pode ser considerada uma ferramenta que proporciona um consistente critério para tomadas de decisão. No caso da otimização na fase de avaliação, o VDI permite uma análise econômica de uma série de cenários de desenvolvimento, com e sem avaliação da informação. Um esforço multidisciplinar é necessário. Um dos principais objetivos desta ferramenta é reduzir o risco econômico, com atenção voltada para campos em desenvolvimento.

Uma vez que uma descoberta é feita, a decisão de ir adiante com o desenvolvimento do campo e de como desenvolvê-lo é influenciada por muitas incertezas do reservatório. A habilidade de tratar com incertezas do reservatório é um fator primário que determina a viabilidade econômica de um projeto de desenvolvimento. Além disso, não é suficiente que um projeto tenha seu VPL positivo, mas também que seu desenvolvimento seja ótimo, isto é, que permita o maior retorno econômico possível.

Os riscos envolvidos na fase de desenvolvimento requerem um gerenciamento e uma redução das incertezas através da otimização do projeto. Em outras palavras, a obtenção de novas informações pode resultar, posteriormente, em aumento do VPL do projeto. O impacto da avaliação no VPL acumulado do projeto é mostrado na Figura 2.7, em que a produção é adiada e o VPL é aprimorado por causa do novo plano de desenvolvimento - especialmente a capacidade de produção e infra-estrutura, que é fornecida com respeito ao potencial do reservatório.

A metodologia proposta tem como objetivo avaliar a informação e mensurar seu valor com a maior precisão possível, levando-se em conta o custo computacional e o tempo de análise, de forma que possa ser aplicada a qualquer campo. Obtido um critério para o cálculo do valor da

informação, podem-se também priorizar ações na caracterização de reservatórios, investindo mais recursos onde o valor da informação traz maiores benefícios.

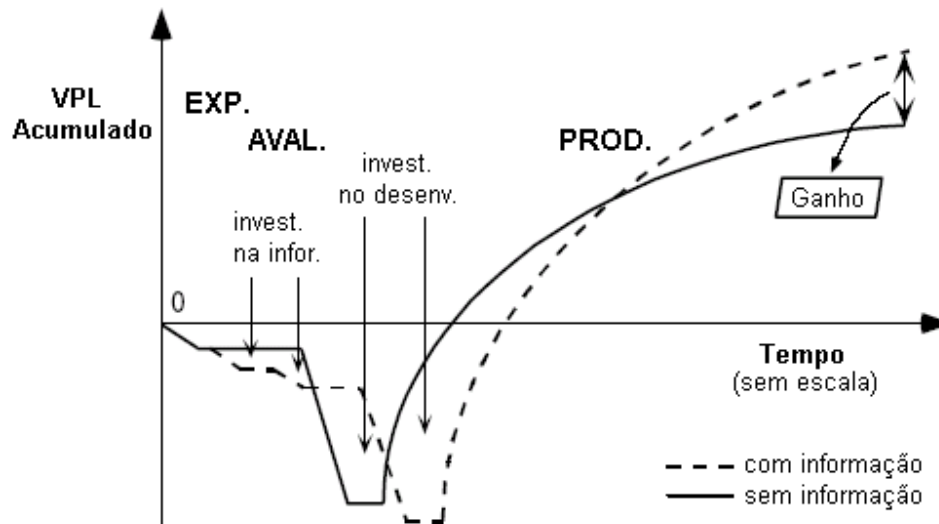


Figura 2.7. Impacto da aquisição de informações no VPL acumulado do projeto (modificada de Demirmen, 2001).

2.3.1 Análise de decisão

A análise de decisão foi desenvolvida para auxiliar gerentes na tomada de importantes decisões em negócios que estão sob condições de incerteza. Os trabalhos pioneiros na área de análise de decisão, segundo Groebner e Shannon [1993], foram desenvolvidos pelos professores Ronald Howard, Howard Raiffa e Robert Schlaifer, responsáveis por desenvolver a teoria de análise de decisão disponível hoje.

Newendorp [1975] comenta que os matemáticos franceses Fermat e Pascal formularam os conceitos fundamentais usados na análise de decisão há quase 350 anos (1654). No entanto, a aplicação destes conceitos em negócios, de forma geral, não se tornou clara até os anos 50, e na exploração de petróleo somente na década de 70. Além disso, descreve que, no dias de hoje, a análise de decisão pode ser resumida através de uma série de etapas:

- Identificar quais opções ou alternativas estão disponíveis;

- Identificar os possíveis resultados que poderão ocorrer para cada uma das decisões a serem tomadas;
- Avaliar lucros e perdas para cada resultado;
- Determinar ou estimar a probabilidade de ocorrência de cada possível resultado;
- Computar o lucro médio ponderado, chamado de valor esperado da decisão alternativa, em que fatores de ponderação são as respectivas probabilidades de ocorrência de cada resultado. Esse lucro médio ponderado é o critério comparativo usado para aceitar ou rejeitar a alternativa. A avaliação quantitativa dessas probabilidades é freqüentemente chamada de análise de risco.

Segundo Groebner e Shannon [1993], a análise de decisão está baseada em três áreas fundamentais: na estatística de Bayes, na teoria do jogo e na análise da preferência e risco, descritas abaixo.

A base da análise de decisão foi tomada no século XVIII, em um trabalho do matemático Thomas Bayes, que descreveu como a inferência estatística pode ser usada como um processo no entendimento de uma situação no mundo real. Seu trabalho pioneiro foi publicado em 1971.

A segunda contribuição à análise de decisão é o conceito da teoria do jogo de John Von Neumann e Oscar Morgenstern. Eles demonstraram que a decisão “correta” em uma situação depende dos objetivos do tomador de decisão e das ações prováveis realizadas por seus competidores.

A terceira área é o trabalho desenvolvido por economistas como Milton Friedman e L. J. Savage. Eles mostraram que a atitude de uma pessoa com relação ao risco depende da circunstância em que a pessoa se encontra. Além disso, diferentes tomadores de decisão, quando se deparam frente à mesma decisão, podem realizar diferentes escolhas.

No processo de tomada de decisão, deve-se ter um critério de como escolher a melhor alternativa. Grant [1970] fala da necessidade de um critério de decisão ou, se possível, de

diversos critérios na tomada de decisão em investimentos, dentre os principais o valor monetário e a taxa de retorno.

Groebner e Shannon [1993] exemplificam diferentes categorias de critérios de decisão, como, por exemplo, não probabilístico e probabilístico. O critério não probabilístico é usado quando as probabilidades associadas aos possíveis períodos de recuperação de um investimento (*payoffs*) são desconhecidas, ou quando há falta de confiança ou informações insuficientes para que o tomador de decisão tenha acesso às diversas possibilidades de *payoffs*. Entretanto, alguns critérios de decisão levam em consideração as probabilidades associadas a cada resultado, chamados critérios probabilísticos (dentre eles, está o critério do valor esperado, especificado adiante).

Na análise da decisão, é comum também a utilização de uma ferramenta chamada árvore de decisão, que consiste em um diagrama que ilustra a ordem cronológica de ações e eventos em problemas de análise de decisão, em que cada ação ou evento é representado por uma ramificação na árvore de decisão. Newendorp [1975] afirma que árvores de decisão são quase sempre usadas quando os problemas envolvem decisões subseqüentes.

O processo de tomada de decisão é dependente do estágio do projeto. Para uma fase de exploração em função do forte cenário regido por incertezas, o processo de tomada de decisão encontra-se relacionado com a análise de viabilidade econômica da acumulação. Em caso positivo, o processo decisório caminha na determinação de maiores informações, estratégias e investimentos para o desenvolvimento. Numa fase de avaliação, a tomada de decisão faz-se necessária para avaliar a continuidade dos investimentos visando a definir o desenvolvimento da produção. Contudo, o conhecimento do prospecto ainda é limitado. Nesse ponto, mais uma tomada de decisão precisa ser feita: optar pelo abandono do horizonte produtor, quando se trata de um horizonte com pouca ou nenhuma atratividade. Uma outra decisão é investir na coleta de mais informações adicionais, devendo levar em consideração os custos de obtenção dessas informações e sua relevância no contexto. Uma terceira decisão nessa fase seria optar por implantar o plano de desenvolvimento [Costa, 2003].

2.3.2 Análise econômica

O Valor Presente Líquido, VPL, é o valor presente líquido necessário para que, a uma taxa mínima de atratividade do mercado, uma aplicação financeira, em um determinado período, tenha a mesma lucratividade que o empreendimento analisado em questão. No caso da análise de exploração de poços de petróleo, as simulações fornecem valores futuros de receitas e custos associados. O lucro líquido transportado para o tempo atual com a taxa de atratividade do mercado corresponde ao VPL – que seria o valor necessário para que uma aplicação financeira com esta taxa, durante o mesmo tempo, proporcionasse o mesmo retorno. A fórmula utilizada para seu cálculo é:

$$VPL = \frac{FC}{(1 + r)^t} \quad (2.3)$$

onde: VPL - valor presente líquido;

r - taxa de desconto ou taxa de atratividade;

FC - fluxo de caixa até o instante t;

t - período de tempo considerado.

Valores positivos do VPL significam que, ao término do período considerado, as receitas superaram os custos e os investimentos. Por outro lado, valores negativos indicam que o investimento não oferece retorno no período considerado.

Um fluxo de caixa esquemático é mostrado na Figura 2.8 para as fases de investimento do campo, incluindo as fases de exploração, avaliação, desenvolvimento e produção.

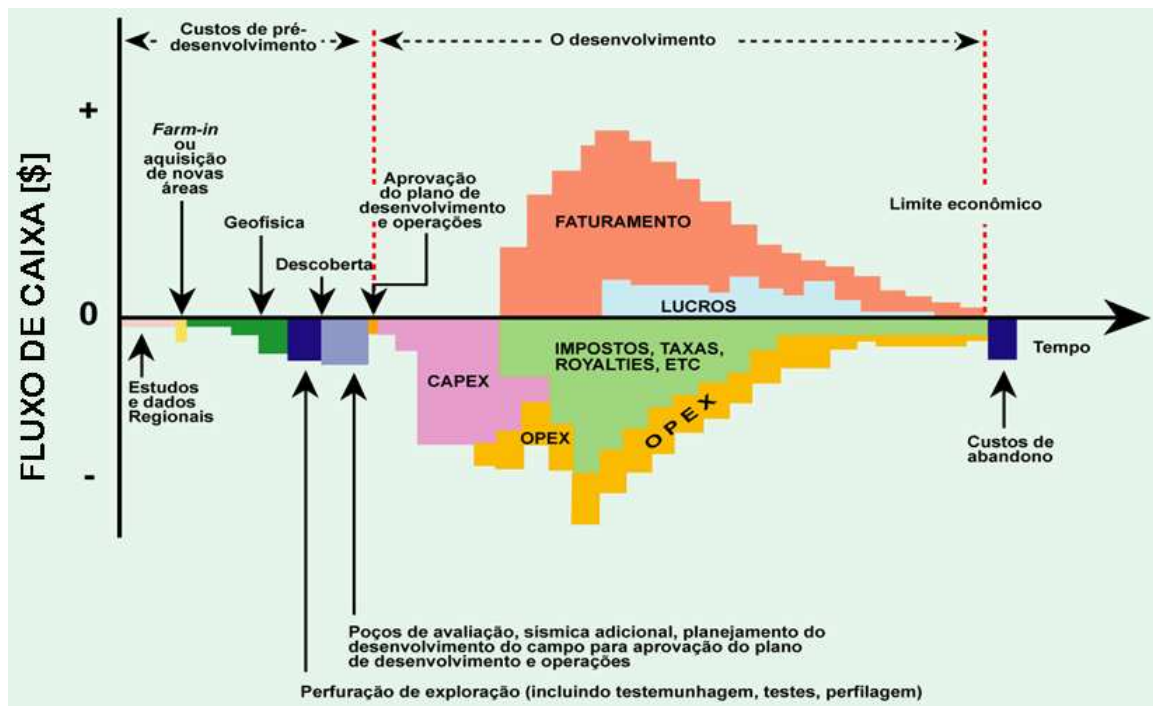


Figura 2.8. Fluxo de caixa típico de um projeto exploratório [Suslick, 2001].

O conceito do valor monetário esperado (VME) é também um item de grande importância para a tomada de decisão sob condições de incerteza e compõe um dos critérios mais usados para análise e seleção de projetos de exploração de petróleo.

Primeiramente, define-se o que é valor esperado: a chance de sucesso vezes o valor do sucesso, menos a chance de fracasso vezes o custo do fracasso (Rose, 2001). Quando o valor esperado é positivo, há investimento; quando é negativo, há risco. Para exemplificar, o autor descreve uma situação em que um dono de cassino possui um determinado número de máquinas e mesas de jogos. As vantagens de cada jogo são bem conhecidas, e elas tendem estar levemente a favor do proprietário. Ele está jogando repetidas vezes o jogo em que o valor esperado para ele é positivo. Se o dono do cassino conhece o número de mesas, o número de jogadores e as regras da casa, ele pode prever com considerável precisão qual será seu lucro.

Contudo, o valor monetário esperado de um projeto é o somatório dos valores potenciais de ganhos ou perdas (VPL) dos eventos, multiplicados pelas suas respectivas probabilidades de ocorrência, como mostra a Equação 2.4, Figura 2.9, Figura 2.10 e Figura 2.11.

$$VME = \sum_{j=1}^N p_j \cdot VPL_j \quad (2.4)$$

onde: p_j – probabilidade de ocorrência do cenário j

VPL_j – valor presente líquido do cenário j

N – número de cenários possíveis

j – índice que varia de 1 a N

e

$$\sum_{j=1}^N p_j = 1 \quad (2.5)$$

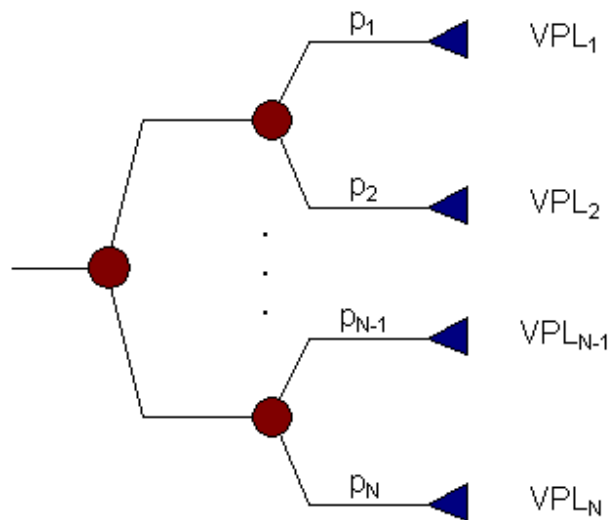


Figura 2.9. Árvore de derivação utilizada no cálculo do VME.

2.3.3 Árvore de decisão

Quando a análise de decisão é aplicada a um problema real, o processo pode tornar-se complexo. O tomador de decisão deve identificar os resultados para cada alternativa de decisão e deve também estimar as probabilidades associadas a cada resultado, designar o período de recuperação de um investimento (*payoff*), determinar seus custos e, de certa forma, manter a sequência de resultados e decisões em uma ordem cronológica. Análise da árvore de decisão é

uma técnica utilizada para orientar o tomador de decisão no processo. A árvore de decisão proporciona um “mapa rodoviário” do problema, ajudando o tomador de decisão a estruturar logicamente o problema.

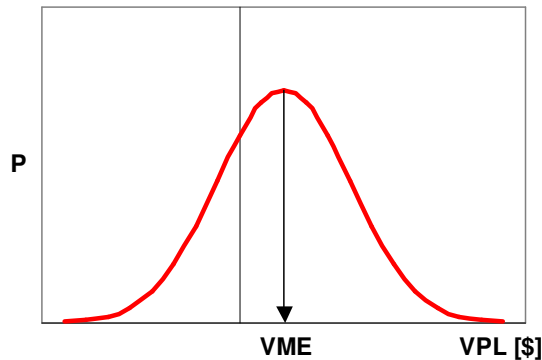


Figura 2.10. Distribuição de probabilidade da função objetivo VPL.

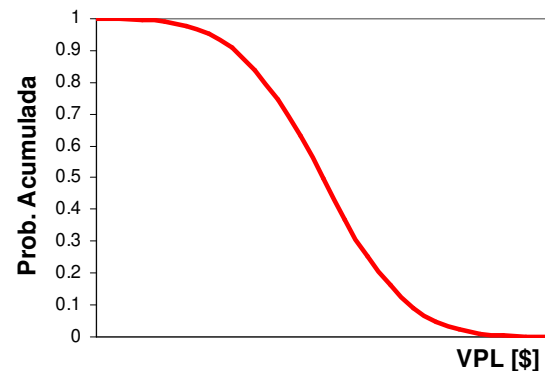


Figura 2.11. Curva de risco para a função objetivo VPL.

O conceito de árvore de decisão é largamente utilizado quando o problema envolve decisões subsequentes. As vantagens desta forma de análise incluem os seguintes pontos:

- Todas as alternativas possíveis de decisão são definidas e analisadas de maneira consistente. A complexa decisão é subdividida em uma série de pequenas partes. Então as partes são reunidas, parte por parte, para proporcionar uma base racional para uma decisão inicial.
- Tal análise fornece uma probabilidade maior para se executar uma ação consistente sobre uma série de decisões.
- Conceitualmente, pode-se analisar qualquer decisão, seja ela qual for, por este método.
- Toda a sequência de ações é preparada previamente para a decisão inicial, forçando o tomador de decisões a pensar adiante.
- A árvore de decisão pode ser usada para seguir o curso dos eventos. Em qualquer nó de decisão, se as condições mudarem, as alternativas restantes podem ser re-analisadas para desenvolver uma nova estratégia para um ponto adiante.

A estruturação envolve propriamente uma seqüência de ações e eventos no processo de decisão do problema. A ação é a decisão ou alternativa sob o controle do tomador de decisão. O evento é o estado da natureza além do controle do tomador de decisão.

Para construir a árvore de decisão, o tomador de decisão deve analisar as possíveis ações e os possíveis eventos cronologicamente. A árvore será formada por uma série de ramificações que representam a ordem cronológica das ações e eventos. A árvore de decisão é completada pela adição dos eventos a cada ramificação de uma ação.

Um exemplo é dado por Newendorp [1975], em que a árvore de decisão ilustra as alternativas de decisão de perfurar ou não perfurar um poço. Se o poço é perfurado, existem então três resultados possíveis: um poço seco, uma reserva de 57 ou de 142 milhões de m^3 de gás, como mostra a Figura 2.12.

Não há escala para a árvore de decisão para o comprimento das linhas ou ramificações. Os ângulos entre as ramificações também não são importantes. As árvores normalmente são lidas da esquerda para a direita e são desenhadas na mesma seqüência em que as decisões são tomadas e em que os eventos ocorrem.

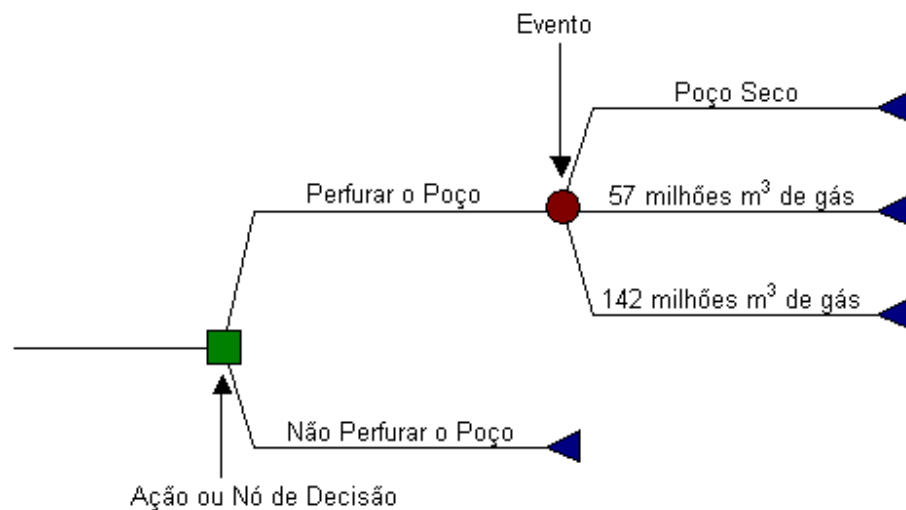


Figura 2.12. Árvore de decisão.

O ponto em que uma ou mais ramificações se originam é chamado de nó. O quadrado simboliza o nó de decisão ou ação, ou seja, um ponto em que o tomador de decisão escolhe qual ramificação vai ser seguida. Já o círculo simboliza o evento, ou seja, um ponto em que a chance de ocorrência ou a incerteza determinam o resultado. A convenção do uso de círculos e quadrados originou-se em alguns artigos referentes à análise de decisão, e ainda é padrão.

O próximo passo na construção da árvore de decisão é a associação das probabilidades a todas as ramificações provenientes dos nós relativos aos eventos. Cada caminho através da árvore, da esquerda para a direita, representa um único cenário. E cada cenário é apresentado pelo ponto terminal, ou seja, o ponto em que não existem mais decisões a serem tomadas ou ocorrências de eventos (triângulo horizontal).

Duas importantes regras devem ser consideradas na árvore de decisão:

- A soma das probabilidades provenientes do mesmo nó deve possuir um somatório igual a 1,0;
- Não existem probabilidades nas ramificações originadas do nó de decisão.

A solução da árvore de decisão é dada calculando-se o valor monetário esperado (VME), multiplicando-se o valor presente líquido pela probabilidade correspondente. A Tabela 2.1 mostra as probabilidades de ocorrência e seus respectivos VPL para os três possíveis resultados.

Tabela 2.1. Dados do Exemplo.

		Perfurar		Não Perfurar	
Resultados Possíveis	Probabilidades	Resultado	VME	Resultado	VME
Poço seco	0,7	-\$50.000	-\$35.000	0	0
57 milhões m ³ de gás	0,2	+\$100.000	+\$20.000	0	0
142 milhões m ³ de gás	0,1	+\$250.000	+\$25.000	0	0
Total	1	VME = +\$10.000		VME = 0	

A árvore de decisão na Figura 2.13 é interpretada como havendo uma probabilidade de 0,7 de o poço perfurado ser seco, resultando em uma perda de \$ 50.000, uma probabilidade de 0,2 de encontrar 57 milhões de m³ de gás, avaliados em \$ 100.000, e, por último, uma probabilidade de 0,1 de encontrar 142 milhões de m³ de gás, avaliados em \$ 250.000.

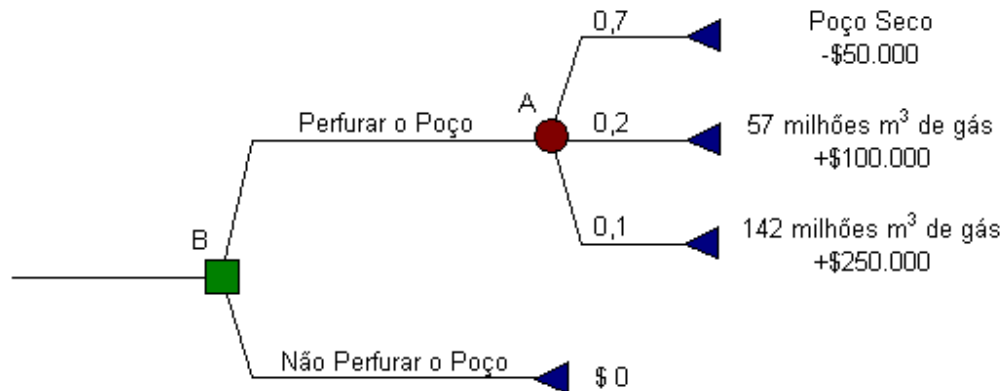


Figura 2.13. Árvore de decisão parcialmente completa.

A regra de decisão para qualquer nó de decisão é selecionar a alternativa ou ramificação que possua o maior valor monetário esperado (VME). Neste caso, seria o nó A, ou seja, seria a opção de perfurar o poço. A análise da árvore de decisão é razoavelmente simples, embora as dificuldades normalmente aumentem com decisões mais complexas.

2.3.4 Estatística

A probabilidade condicional pode ser usada no processo de tomada de decisões em muitos tipos de situações em negócios. A regra geral para a determinação da probabilidade condicional é dada pela Equação 2.6:

$$P(A_i / B) = \frac{P(B e A_i)}{P(B)} = \frac{P(A_i)P(B / A_i)}{P(B)} \quad (2.6)$$

O denominador da Equação 2.6, $P(B)$, que é a probabilidade do evento dado que, para ter ocorrido, utiliza-se a Equação 2.7:

$$P(B) = \sum P(B \cap A_i) = \sum P(A_i) P(B / A_i) \quad (2.7)$$

onde A_i é um grupo de eventos mutuamente exclusivo.

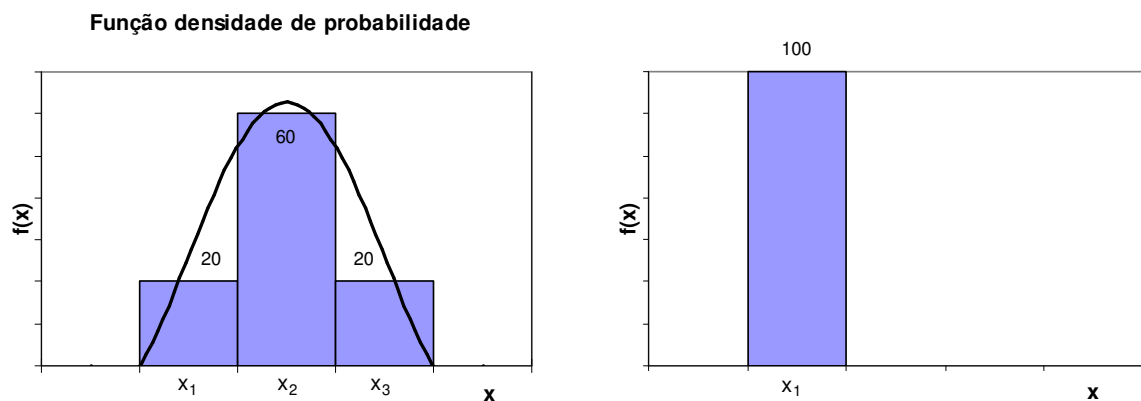
Outra maneira de escrever a Equação 2.6 é mostrada a seguir através da Equação 2.8, chamada de Regra ou Teorema de Bayes: seja A_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$) um grupo completo de eventos mutuamente exclusivos. Seja B outro evento que é precedido por um evento A_i . Ambos $P(A_i)$ e $P(B/A_i)$ devem ser conhecidos. Então:

$$P(A_i / B) = \frac{P(A_i) P(B / A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) P(B / A_i)} \quad (2.8)$$

2.3.5 Informação Completa

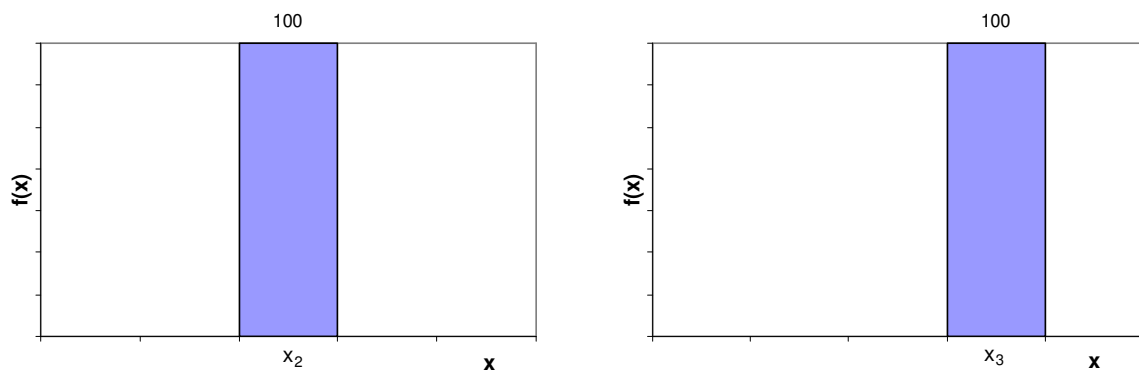
A informação pode ser considerada completa se, ao ser adquirida, elimina toda a dúvida sobre o atributo, ou seja, a incerteza se reduz a zero. Na prática, esse conceito pode ser usado quando a incerteza é reduzida a um nível que não influencia mais o risco e o valor monetário esperado do projeto.

Um exemplo hipotético da obtenção de uma informação completa é mostrado na Figura 2.14. Para efeitos práticos, a função densidade de probabilidade (fdp) de um determinado parâmetro (x) é discretizada em 3 níveis: um pessimista (20%), um mais provável (60%) e outro otimista (20%), como mostra o Item (a). Com a aquisição da informação completa, que eliminará totalmente a incerteza em relação a este atributo, a função densidade de probabilidade resultante pode ser expressa por três possibilidades (Itens (b), (c) e (d)). O Item (b) mostra que o atributo (x) corresponde ao valor determinístico x_1 , com 100% de chance de ocorrência. O mesmo para os Itens (c) e (d), em que o atributo (x) corresponde aos valores x_2 e x_3 , respectivamente, com 100% de chance de ocorrência, ou seja, a informação vai determinar qual é o valor real, entre os três esperados.



(a) Função densidade de probabilidade de um parâmetro (x) discretizada em três níveis sem a obtenção da informação ($p_1 = 20\%$, $p_2 = 60\%$ e $p_3 = 20\%$).

(b) Função densidade de probabilidade de um parâmetro (x) após a obtenção da informação completa ($p_1 = 100\%$).



(c) Função densidade de probabilidade de um parâmetro (x) após a obtenção da informação completa ($p_2 = 100\%$).

(d) Função densidade de probabilidade de um parâmetro (x) após a obtenção da informação completa ($p_3 = 100\%$).

Figura 2.14. Função densidade de probabilidade (fdp) de um parâmetro (x) discretizada em 3 níveis.

A informação vai, então, transformar o nó da árvore, que antes era de derivação (Figura 2.15), simbolizando um evento (círculo), em um nó de decisão, simbolizando uma tomada de decisão (quadrado), como mostra a Figura 2.17. É importante notar que as probabilidades de

ocorrência dos 3 ramos da Figura 2.17 são as mesmas que as da Figura 2.15, para que o VDI (Valor da Informação) seja corretamente calculado, ou seja, a Figura 2.17 representa a decisão que seria tomada dentre as possíveis, caso a informação fosse obtida, determinado-se o VME possível com a obtenção da informação. A Figura 2.16 pode ser simplificada, tornando-se a árvore de decisão da Figura 2.17.

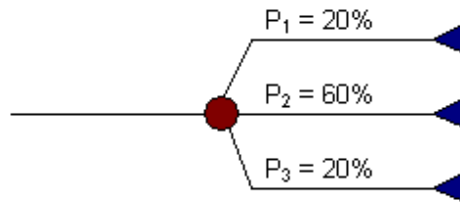


Figura 2.15. Árvore de derivação com 3 possibilidades de ocorrência (3 níveis).

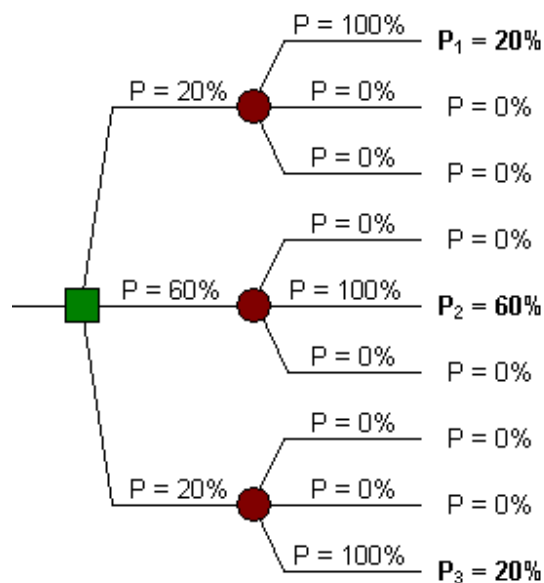


Figura 2.16. Árvore de decisão com 3 possibilidades de ocorrência (3 níveis).

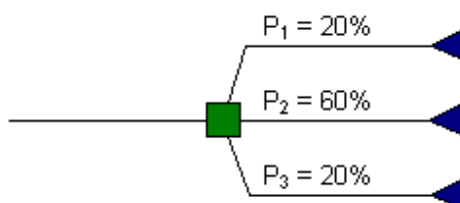


Figura 2.17. Árvore de decisão com 3 possibilidades de ocorrência (simplificada).

O cálculo do VDI é feito através das duas árvores: a de derivação e a de decisão. Na Figura 2.15, deve-se escolher a estratégia que maximiza o VME entre os 3 ramos (caso sem informação). Na Figura 2.17, cada ramo tem sua estratégia ótima, pois a informação vai ser coletada antes da decisão, resultando em VME maior ou igual ao caso sem a informação. Esse valor nunca é menor, pois, no mínimo, o mesmo resultado da análise sem informação pode ser gerado através da mesma estratégia de produção.

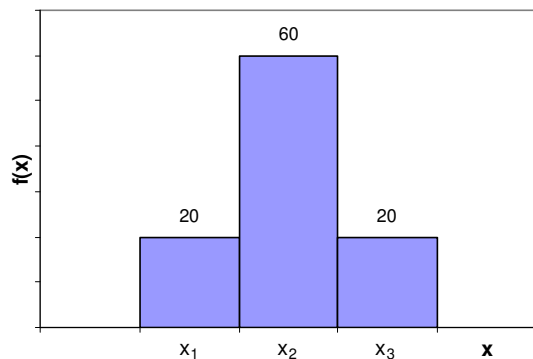
2.3.6 Informação Incompleta

A informação incompleta não elimina toda a dúvida sobre o atributo, ou seja, a incerteza é reduzida, mas não tende a zero.

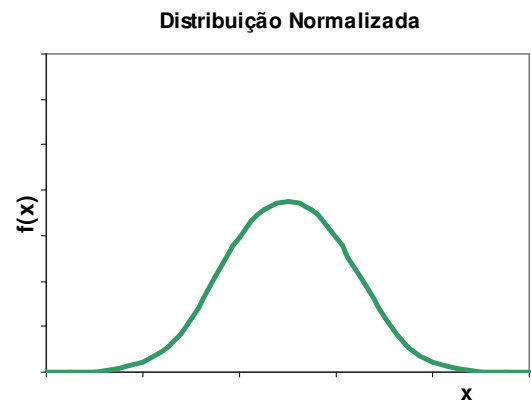
Um exemplo hipotético da obtenção de uma informação incompleta é mostrado na Figura 2.18. Na prática, pode-se discretizar a função densidade de probabilidade (fdp) do atributo (x) em 3 níveis, como exemplificado na Figura 2.18, Item (a). A obtenção da informação incompleta resulta na separação do atributo em, por exemplo, 2 níveis: um com caráter otimista e outro com caráter pessimista, com as mesmas probabilidades de ocorrência coerentes com a árvore sem informação (Item (c) similar ao Item (d) e Item (e) similar ao Item (f)), ou seja, a informação separa a curva de incerteza do atributo em mais de uma curva que, somada, será idêntica à original (Item (b)).

A informação vai então transformar o nó da árvore, que antes era de derivação (Figura 2.15), em decisão (Figura 2.19). É importante notar que as probabilidades de ocorrência dos ramos finais da árvore são as mesmas, para que o VDI (Valor da Informação) seja corretamente calculado.

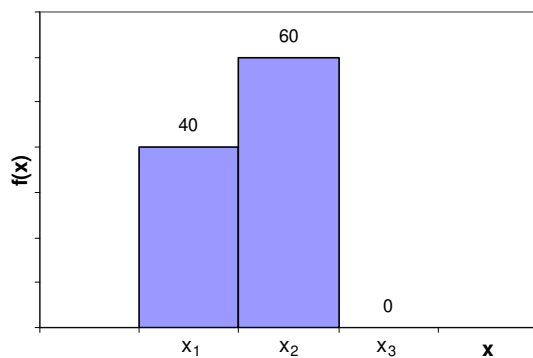
Novamente, o cálculo do VDI deve ser feito através das duas árvores: a de derivação e a de decisão. Na Figura 2.15, deve-se escolher a estratégia que maximiza o VME entre os 3 ramos. Na Figura 2.19, cada ramificação do nó de decisão tem sua estratégia otimizada para obter o melhor VME, considerando-se os 2 ramos de decisão. A árvore de decisão da Figura 2.19 pode ser simplificada, tornando-se então a árvore de decisão da Figura 2.20.



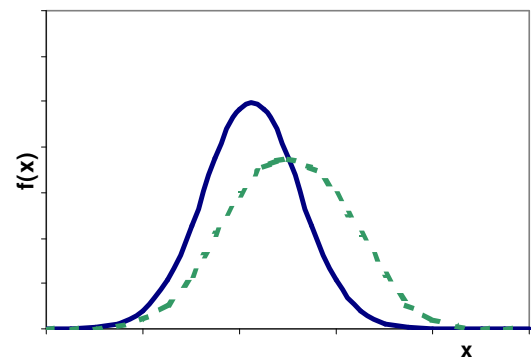
(a) Função densidade de probabilidade discretizada.



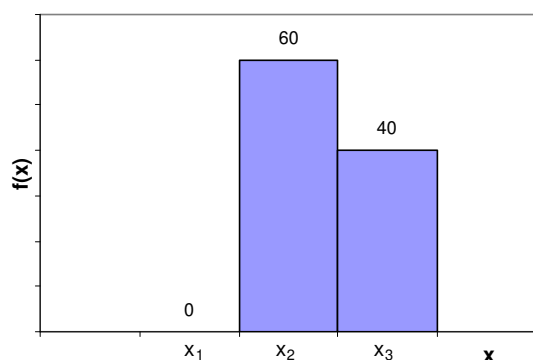
(b) Função densidade de probabilidade contínua (verde) é dividida em dois níveis de probabilidades de ocorrência (azul e vermelho).



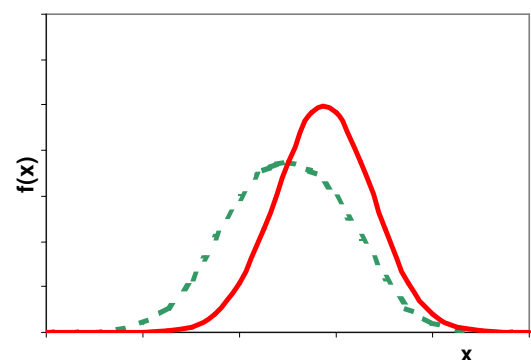
(c) Informação incompleta ($p_1 = 20\%$ e $p_2 = 30\%$).



(d) Distribuição normal de ocorrência para a informação incompleta (nível 1).



(e) Informação incompleta ($p_2 = 30\%$ e $p_3 = 20\%$).



(f) Distribuição normal de ocorrência para a informação incompleta (nível 2).

Figura 2.18. Função densidade de probabilidade discretizada para a informação incompleta.

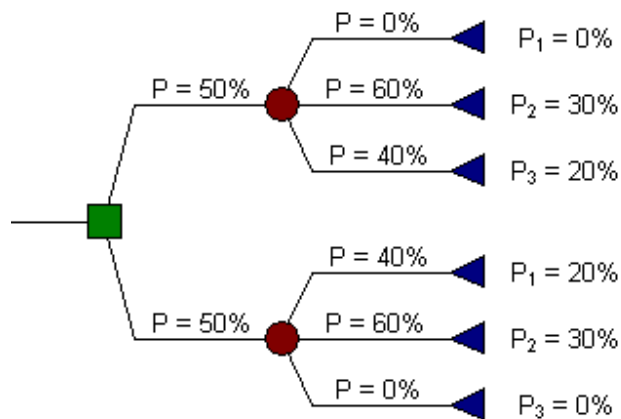


Figura 2.19. Árvore de decisão com 2 níveis, cada um com 3 derivações.

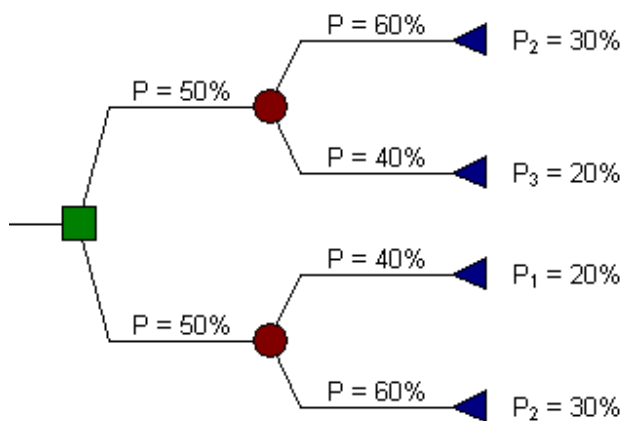


Figura 2.20. Árvore de decisão com 2 níveis, cada um com 2 derivações (simplificado).

É interessante observar que o VME desse caso é maior ou igual ao caso sem informação e menor que o caso com informação completa. Essa diferença é derivada das diferentes estratégias traçadas para cada caso. No caso sem informação, existe somente uma estratégia para todas as possibilidades. Para o caso com informação incompleta, existem duas estratégias (uma para cada possibilidade, uma otimista e outra pessimista) e, para o caso com informação completa, são 3 estratégias (uma para cada possibilidade).

2.3.7 Informação com poucas variáveis

A análise do valor da informação, no caso em que existem poucas variáveis, pode ser feita através da comparação das árvores de derivação e decisão, com e sem a obtenção da informação. Já que o número de modelos é reduzido, todos podem ter suas estratégias otimizadas.

2.3.8 Informação com muitas variáveis

A complexidade do processo de cálculo e análise do valor da informação é dada quando o número de variáveis consideradas no problema aumenta significativamente, de maneira que se torna inviável a otimização de todas as estratégias referentes a cada ramo da árvore possível, não somente relacionado ao número de simulações a serem realizadas, como também ao tempo despendido no processo.

A utilização dos modelos geológicos representativos (MGR) torna possível a análise do cálculo do valor da informação, reduzindo o tempo e o número de simulações do processo. Os MPG podem ser usados de duas formas:

- Representando a variabilidade geológica para que diferentes estratégias de produção sejam otimizadas e testadas com o objetivo de tirar proveito dos cenários possíveis resultantes da informação;
- Simplificando a árvore de derivação, como nos trabalhos de Costa [2003] e Schiozer *et al.* [2004].

A princípio, as duas simplificações citadas acima são independentes, ou seja, podem ser aplicadas separadamente. Neste trabalho, foram feitos testes somente com a primeira simplificação e com as duas simultaneamente, conforme apresentado nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Metodologia Proposta

3.1 Metodologia

O desenvolvimento de campos de petróleo é feito sob condições de incerteza, não somente relacionadas à caracterização geológica do reservatório, como também a parâmetros econômicos. Dependendo do nível de conhecimento do campo em estudo, pode-se iniciar o desenvolvimento do mesmo, abandoná-lo ou optar por obter novas informações. A análise do valor da informação pode ser considerada como um critério econômico utilizado em processos de tomada de decisões que envolvem a quantificação de incertezas e a avaliação econômica de diversos cenários de desenvolvimento. Também pode ser utilizada como critério de parada na avaliação de projetos em que a obtenção de novas informações torna-se desnecessária ou inviável economicamente, permitindo o início do desenvolvimento do campo.

Apesar de este conceito estar bem difundido em muitas bibliografias, nenhuma delas explica claramente como se calcula o valor da informação nas fases de avaliação e desenvolvimento em que existem muitos parâmetros incertos, tornando-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia que viabilize e calcule o valor da informação, como a mostrada neste trabalho.

A metodologia proposta a seguir refere-se à determinação do valor da informação para cenários genéricos, complexos ou não, caracterizados por poucos ou muitos parâmetros incertos.

Está descrita e subdividida abaixo e demonstrada na Figura 3.1. Parte destes tópicos pertence à metodologia de análise de risco abordada no capítulo anterior:

- Aplicação da metodologia de análise de risco;
- Composição da curva de risco do projeto para a estratégia inicial, definição de seus percentis e verificação do risco agregado ao projeto;
- Composição da árvore de derivação e verificação dos atributos passíveis de redução de incerteza, através da obtenção da informação;
- Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão;
- Escolha dos modelos representativos;
- Otimização da estratégia de cada modelo representativo;
- Cálculo do VME sem informação e com informação;
- Escolha do método de cálculo dos VME sem e com informação;
- Cálculo do valor da informação.

O fluxograma na Figura 3.1 demonstra a metodologia de cálculo do valor da informação. Primeiramente, deve-se obter um modelo nomeado de caso base (mais provável) e aplicar a metodologia de análise de risco (conseqüentemente obter a curva de risco).

Uma análise do risco do projeto é feita através da curva de risco. Posteriormente, a árvore de derivação é construída, de forma que a suposta obtenção da informação transforme a mesma em árvore de decisão, ou seja, o que era uma possibilidade (evento), torna-se uma decisão.

Modelos que possam representar as incertezas geológicas do reservatório são escolhidos e otimizados. Após o processo de otimização, cada estratégia é substituída em cada modelo geológico representativo. Esta etapa verifica se o modelo base está realmente otimizado (considerando que o modelo base é um dos modelos representativos), e se o restante dos modelos também estão. Caso a estratégia do caso base não esteja otimizado, o mesmo deve ser re-otimizado, se a diferença entre os VPL for significativa. Para o caso em que os outros modelos representativos não estejam otimizados, os mesmos devem ser re-otimizados.

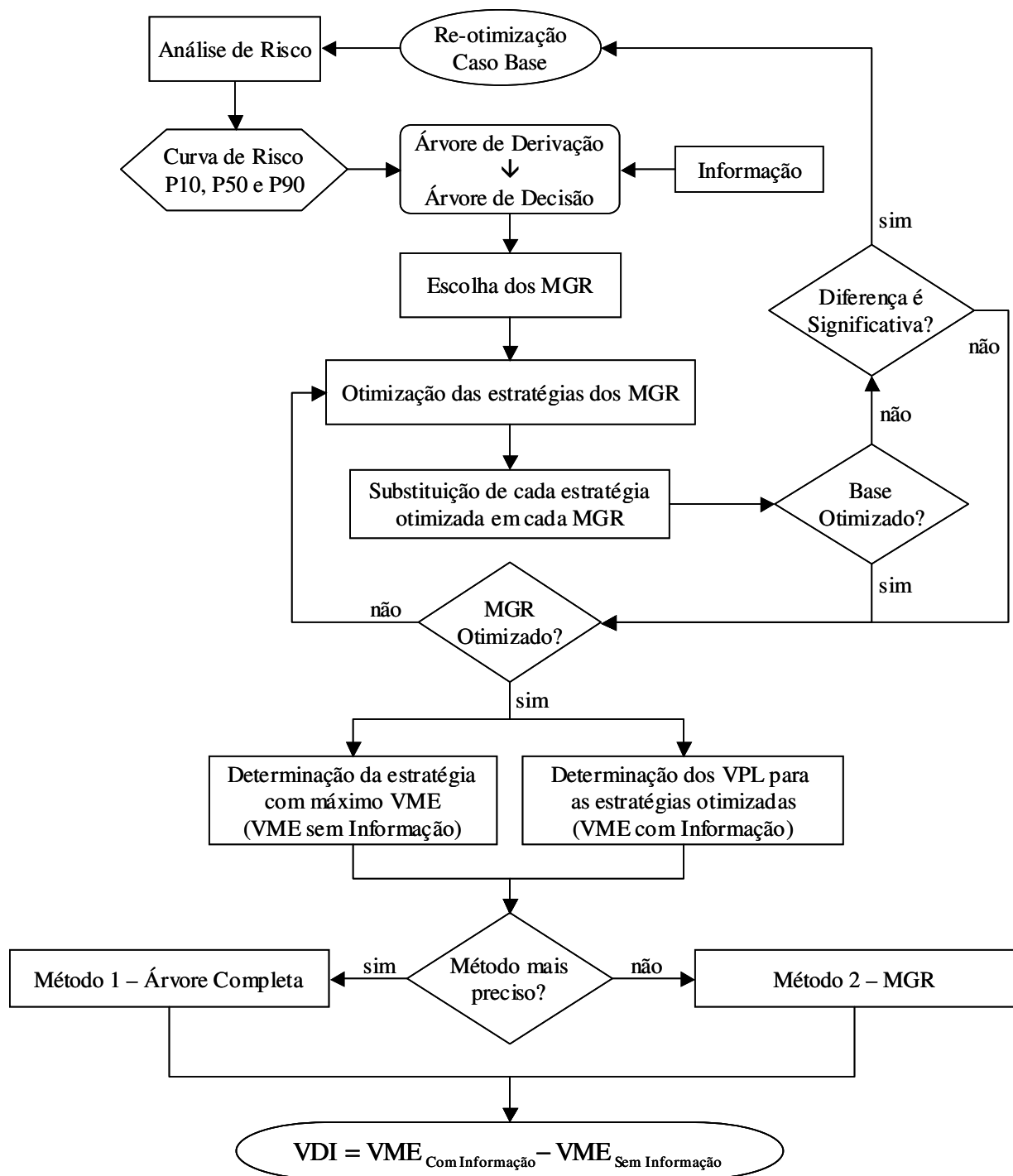


Figura 3.1. Fluxograma da metodologia proposta para o cálculo do valor da informação.

Os VME sem e com informação podem ser calculados de várias formas; nesse trabalho, foram calculados por dois métodos: o primeiro é um método mais preciso (Método da Árvore Completa), porém, exige um número maior de simulações; o segundo (Método dos MGR) é simplificado mas, menos preciso. O VME para o caso sem informação corresponde ao melhor VME obtido com a estratégia otimizada de um determinado modelo. Já o VME com informação é equivalente ao VME sem informação mas a estratégia otimizada é aplicada aos cenários possíveis provenientes da informação. Dessa forma, o VME sem informação demanda uma estratégia única para todos os modelos e o VME com informação possibilita que várias estratégias sejam aplicadas a cada ramo da árvore de derivação, sendo portanto, estratégias mais adequadas aos modelos que estão sendo aplicadas e, com isso, adicionando valor ao VME.

Serão detalhados abaixo somente os passos referentes à metodologia do cálculo do valor da informação.

3.1.1 Composição da curva de risco do projeto

Após a aplicação da metodologia de análise de risco, a curva de risco da função objetivo desejada (no caso, a função VPL) é gerada para o período de produção considerado, como mostra a Figura 3.2. A curva 0 representa uma curva de risco hipotética, a curva 2 representa a curva com o maior valor monetário esperado (deslocada para a direita do eixo da ordenada) e a curva 1 representa a curva com menor risco, dentre as três, associado ao projeto em questão. Caso a informação obtida altere as tomadas de decisões vinculadas à estratégia de produção, reduzindo o risco e as incertezas do projeto, a curva 0 se tornará semelhante às curvas 1 e/ou 2.

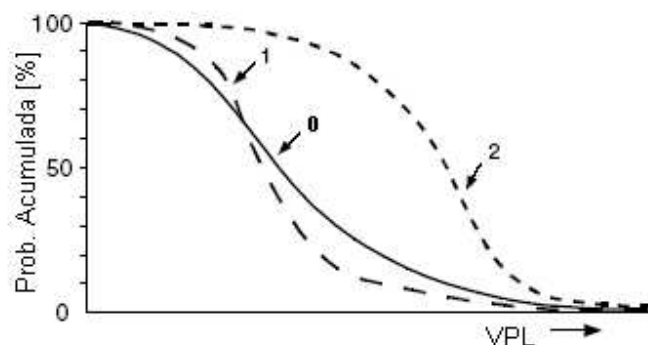


Figura 3.2. Exemplos de curvas de risco de um projeto (modificada de Demirmen, 2001).

3.1.2 Composição da árvore de derivação

A composição da árvore de derivação deve ser feita a partir da análise de sensibilidade realizada previamente no processo de análise de risco, em que o número de atributos críticos (z) e seus respectivos níveis de incerteza (y) são determinados. O número de ramificações presentes na árvore de derivação pode ser representado por y^z . Por exemplo, se houver quatro atributos com três níveis de ocorrência e um com dois níveis de ocorrência, o número total de ramos na árvore de derivação será: $3^4 \cdot 2^1 = 162$ modelos.

Contudo, dentre todos os atributos críticos, deve-se verificar quais atributos são passíveis de redução de incerteza através da obtenção da informação. Por exemplo, perfurando-se um poço, realizando-se uma sísmica 3D, testes de pressão e de laboratório ou estudos detalhados, determinando quais variáveis incertas que são críticas podem ser alvo da redução de incertezas obtendo-se tais informações.

3.1.3 Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão

A árvore de derivação se transforma em árvore de decisão (Figura 3.3) quando um ou mais nós de ocorrência de eventos (círculo) se transformam em nós de decisão (quadrado), ou seja, um ponto em que o tomador de decisão escolhe qual ramificação vai ser seguida. Isto ocorre quando

a informação é supostamente obtida, determinando ou definindo diferentes estratégias elaboradas para cada caso específico da ramificação.

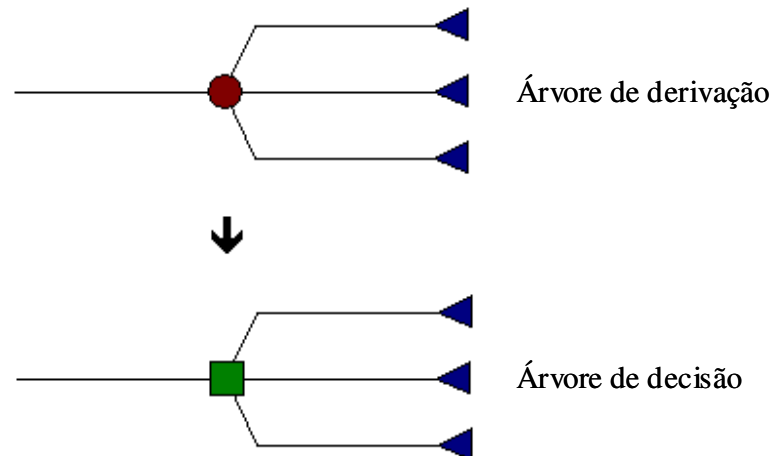


Figura 3.3. Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão.

A composição e a transformação da árvore de derivação em árvore de decisão são executadas verificando-se os atributos passíveis de redução de incerteza através da obtenção da informação. Esta verificação deve ser feita através da escolha do tipo de informação que se deseja obter. Após a definição desta etapa, a árvore de derivação torna-se árvore de decisão, de forma que a obtenção da informação determine o rumo das decisões a serem tomadas, considerando a informação como completa e incompleta.

Por definição, o termo “grupo” está sendo usado para designar um ramo derivado da decisão. Na Figura 3.3, por exemplo, a árvore de derivação é composta apenas por um grupo e a árvore de decisão é composta por três grupos. Esta definição é importante para a quantificação do VDI pois esse depende da escolha da estratégia adequada para cada grupo. Nesta mesma figura, sem a informação, deve-se optar por uma estratégia única (pois há apenas um grupo); com a informação, pode-se optar para uma estratégia adequada para cada grupo, ou seja, três.

3.1.4 Informação Completa⁵

A informação completa corresponde à informação em que foi obtida a redução total de sua incerteza. Considerando-se um caso com “z” atributos críticos incertos com “y” níveis de incerteza, pode-se gerar y^z modelos possíveis. Supondo que a informação é completa e que vai reduzir a incerteza de “x” atributos com “y” níveis cada, a árvore com informação vai ser subdividida em y^x ramos, que corresponde ao número de grupos presente na árvore. Deve-se então definir uma estratégia otimizada para cada grupo escolhidos *a priori*, que inicialmente eliminarão a incerteza de “x” atributos. A árvore de decisão terá então “G” grupos (representando cada ramo), cada um com $\frac{y^z}{y^x} = \frac{y^z}{G} = y^{z-x} = N_G$ modelos.

3.1.5 Informação Incompleta⁶

A informação incompleta corresponde à informação em que não foi obtida a redução total de sua incerteza. Por exemplo, quando um poço é perfurado, pode-se reduzir a incerteza com relação à permeabilidade do reservatório, com valores mais otimistas ou mais pessimistas, mas não eliminá-la totalmente.

Levando-se em conta outro ponto de vista, principalmente na fase de exploração, alguns autores afirmam que a informação imperfeita (tratada aqui também como incompleta) pode ser considerada como a informação obtida através de um equipamento ou processo que possui uma determinada probabilidade de erro, ou seja, torna-se relevante a confiabilidade do mesmo.

⁵ Neste trabalho, o termo informação completa está sendo usado para referenciar informação completa e perfeita, ou seja, que tira toda a dúvida sobre a incerteza e com total confiabilidade.

⁶ A informação pode ser incompleta se não for suficiente para reduzir totalmente a incerteza sobre o atributo e pode ainda ser imperfeita se não houver confiabilidade total no valor medido. Neste trabalho, para simplificar o texto, apenas o termo incompleta está sendo utilizado para representar redução parcial das incertezas.

3.1.6 Escolha dos Modelos Representativos

O item de principal destaque desta metodologia se concentra neste tópico, que corresponde à escolha de modelos, dentre todos os modelos numéricos simulados possíveis que sejam capazes de representar fielmente as variações geológicas e também as variações das estratégias de produção. O critério de escolha destes modelos não é semelhante ao das literaturas citadas na revisão bibliográfica, embora siga a mesma linha de raciocínio.

O cálculo do valor da informação vai depender de quanto se pode tirar proveito da informação para a seleção de sua estratégia. Para um caso com muitas variáveis, é quase impossível compor a árvore toda, devido à sua dimensão. Dessa forma, os modelos representativos devem ser utilizados para viabilizar o processo de cálculo.

O critério de escolha dos modelos representativos depende: (1) do número de variáveis passíveis de redução de incerteza, juntamente com seus respectivos níveis, isto é, quanto maior o número de parâmetros que terão suas incertezas eliminadas ou reduzidas através da obtenção de novas informações, maior o número de modelos representativos; (2) da disposição da nuvem de pontos no gráfico VPL *versus* FR, estando dispersos ou concentrados, o que significa uma diferença grande ou não entre os valores de VPL e FR e, conseqüentemente, diferença nas possíveis estratégias de produção; (3) de quão concentradas estão as probabilidades de ocorrência de cada modelo, ou seja, altas probabilidades de ocorrência concentradas em determinados modelos devem ser diluídas em um número maior de modelos; (4) da necessidade e importância que o projeto representa para a empresa, ou seja, do nível de confiança que se deseja obter no processo, porque, quanto maior o número de modelos representativos, maior a precisão e confiabilidade no cálculo; e (5) do tempo disponível para a realização do cálculo e análise do valor da informação.

3.1.7 Otimização dos Modelos Representativos

A otimização dos modelos representativos é muito importante no processo de cálculo do valor da informação, pois a variação dos VPL entre o modelo não otimizado e o modelo otimizado, ponderado através das probabilidades de ocorrência de cada modelo representativo, fornecerá o valor da informação, considerando o cálculo dos VME através dos MGR. Os VME com e sem informação também podem ser obtidos através das estratégias otimizadas e da árvore de decisão completa. Portanto, para ambos os métodos, quanto melhor ou mais eficiente a otimização da estratégia de cada modelo, maior a precisão e confiabilidade no cálculo do valor da informação.

Entretanto, o processo de otimização de cada modelo leva tempo, devido ao número de parâmetros a serem alterados e ao elevado número de simulações que devem ser realizadas por tentativa e erro para maximizar uma ou mais funções objetivo. Considerando que o processo de otimização de um modelo exige, no mínimo, aproximadamente de 30 a 40 simulações, ao final do processo, dependendo do número de modelos representativos, serão mais de 210 simulações (considerando-se 6 modelos representativos e, em média, 35 simulações).

3.1.8 Cálculo dos VME sem e com informação

3.1.8.1 Método 1 – Método da Árvore Completa⁷

VME sem informação

Após a otimização das estratégias dos “ n_{MGR} ” modelos representativos, todos os modelos da árvore devem ser simulados com cada uma das “ n_{EST} ” estratégias otimizadas, de forma que

⁷ Neste método o nº de modelos representativos (n_{MGR}) é idêntico ao nº de estratégias otimizadas (n_{EST}).

uma estratégia com o maior VME deve ser selecionada para representar o caso estudado sem a obtenção da informação.

A Equação 3.1 mostra o cálculo do VME sem informação através da árvore completa:

$$\text{VME}_{\text{SI}} = \max_{w=1}^{n_{\text{EST}}} \left\{ \sum_{j=1}^N \left[\left(\text{VPL}_{\text{estratégia}(w), \text{modelo}_j} \right) \cdot P_{\text{modelo}_j} \right] \right\} \quad (3.1)$$

onde: n_{EST} – número de estratégias otimizadas

w – índice que varia de 1 a n_{EST}

N – número total de modelos ou cenários possíveis

j – índice que varia de 1 a N

É importante observar que o uso da Equação 3.1 pode resultar em um número de simulações grande, isto é, o número de estratégias (uma para cada modelo representativo) vezes o número total de cenários (ramos da árvore).

VME com informação

Considerando o cálculo do VME com informação através da árvore completa, o valor do VME com a informação generalizado para “ w ” estratégias:

$$\text{VME}_{\text{CI}} = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{\text{EST}}} \left[\sum_{\ell=1}^{N_G} \left(\text{VPL}_{\text{estratégia}(w), \text{modelo}_\ell} \right) \cdot P_{\ell} \right] \right\}_{(k)} \quad (3.2)$$

onde: n_{EST} e w foram definidos após a Equação 3.1

N_G – número de modelos ou cenários por grupo

ℓ – varia de 1 a N_G

G – número de grupos da árvore

k – varia de 1 a G

É importante observar que o acréscimo do VME vem da comparação das Equações 3.1 e 3.7. Na Equação 3.1, só uma estratégia deve ser escolhida, aquela que maximiza o VME de toda a árvore. Na Equação 3.7, cada grupo terá uma estratégia adequada para os modelos do grupo, ou seja, a que maximiza o VME do grupo.

A generalização da expressão do VME com e sem informação é dada por:

$$VME = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{EST}} \left[\sum_{\ell=1}^{N_G} \left(VPL_{\text{estratégia}(w), \text{modelo}_\ell} \right) \cdot P_\ell \right] \right\}_{(k)} \quad (3.3)$$

Para $G = 1$ e $N_G = N$ a equação torna-se o VME_{SI} . Para $G > 1$ a equação torna-se o VME_{CI} .

3.1.8.2 Método 2 – Método dos MGR⁸

VME sem informação

Na impossibilidade de simular todos os modelos para todas as estratégias, pode-se simplificar ainda mais o processo pelo cálculo do VME sem informação através dos MGR, o valor monetário esperado (VME) para uma determinada estratégia fixa 1 possível para todos os modelos da árvore representados pelos MGR é dada por:

$$VME_{\text{estratégia}(1)} = \left[\left(VPL_{\text{estratégia}(1), MGR_1} \right) \cdot P(MGR_1) + \left(VPL_{\text{estratégia}(1), MGR_2} \right) \cdot P(MGR_2) + \left(VPL_{\text{estratégia}(1), MGR_3} \right) \cdot P(MGR_3) + \dots + \left(VPL_{\text{estratégia}(1), MGR_{n_{MGR}}} \right) \cdot P(MGR_{n_{MGR}}) \right] \quad (3.4)$$

A Equação acima mostra o somatório de cada VPL obtido com uma determinada estratégia fixa empregada em cada modelo representativo pré-determinado, multiplicado pela sua respectiva probabilidade de ocorrência, podendo ser representado por:

⁸ Neste método o n° de modelos representativos (n_{MGR}) pode ser maior do que o n° de estratégias otimizadas (n_{EST}) para aumentar a precisão do método.

$$VME_{\text{estratégia (1)}} = \sum_{i=1}^{n_{MGR}} [(VPL_{\text{estratégia (1), MGR}_i}) \cdot P(MGR_i)] \quad (3.5)$$

•
•
•

$$VME_{\text{estratégia (n}_{EST})} = \sum_{i=1}^{n_{MGR}} [(VPL_{\text{estratégia (n}_{EST}), MGR_i}) \cdot P(MGR_i)] \quad (3.6)$$

Generalizando para “w” estratégias otimizadas e “i” modelos representativos:

$$VME_{\text{estratégia (w)}} = \sum_{i=1}^{n_{MGR}} [(VPL_{\text{estratégia (w), MGR}_i}) \cdot P(MGR_i)] \quad (3.7)$$

onde: n_{MGR} e w foram definidos após a Equação 3.1

i – índice que varia de 1 a n_{MGR}

O valor monetário esperado sem a obtenção da informação é dado pelo máximo VME obtido para uma determinada estratégia fixa:

$$VME_{SI} = \max_{w=1}^{n_{EST}} \left\{ \sum_{i=1}^{n_{MGR}} [(VPL_{\text{estratégia (w), MGR}_i}) \cdot P(MGR_i)] \right\} \quad (3.8)$$

É importante observar que o cálculo mais preciso é feito pela Equação 3.1. A simplificação através dos representativos pode ser usada em casos em que o esforço computacional for considerado muito grande. O uso das 2 opções está sendo mostrado neste trabalho. Soluções intermediárias podem ser usadas tais como: o uso de apenas algumas estratégias otimizadas para os representativos, descartando estratégias parecidas; o uso de um número de modelos maior que o número de representativos e o uso do número total para cálculo do VME.

VME com informação

A mesma simplificação pode ser feita no VME com informação, ou seja, considerando o cálculo do VME sem informação através dos MGR, o valor do VME com a informação é calculado através do somatório dos máximos VPL, multiplicados por suas respectivas probabilidades de ocorrência, de cada estratégia correspondente a cada MGR:

$$VME_{CI} = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{EST}} \left[\left(VPL_{estratégia(w), MGR_1} \right) \cdot P(MGR_1) + \left(VPL_{estratégia(w), MGR_2} \right) \cdot P(MGR_2) + \right. \right. \\ \left. \left. \left(VPL_{estratégia(w), MGR_3} \right) \cdot P(MGR_3) + \dots + \left(VPL_{estratégia(w), MGR_{n_{MGR}}} \right) \cdot P(MGR_{n_{MGR}}) \right] \right\}_{(k)} \quad (3.9)$$

$$VME_{CI} = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{EST}} \left[\sum_{i=1}^{N_G} \left(VPL_{estratégia(w), MGR_i} \right) \cdot P(MGR_i) \right] \right\}_{(k)} \quad (3.10)$$

A generalização da expressão do VME com e sem informação é dada por:

$$VME = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{EST}} \left[\sum_{i=1}^{N_G} \left(VPL_{estratégia(w), MGR_i} \right) \cdot P(MGR_i) \right] \right\}_{(k)} \quad (3.11)$$

Para $G = 1$ e $N_G = n_{MGR}$ a equação torna-se o VME_{SI} . Para $G > 1$ a equação torna-se o VME_{CI} . A Equação 3.11 é idêntica à 3.3, houve apenas a simplificação da árvore.

A precisão requerida e o esforço computacional permitido também devem limitar as escolhas do tipo de cálculo. O importante é usar o mesmo procedimento para o cálculo do VME com e sem informação, ou seja, a padronização do processo.

3.1.9 Determinação das probabilidades de ocorrência dos MGR

Assim como o número de representativos é ainda alvo de investigação, pois quanto maior o número de representativos melhor é a precisão do cálculo do VDI, a atribuição da probabilidade

de cada modelo também deve ser feita com cuidado, pois pode influenciar a resposta de maneira significativa. Essas probabilidades são importantes para o caso de utilização do processo simplificado dos Itens 3.1.8.2 e 3.1.9.2. Neste trabalho, são apresentados três métodos de cálculo das probabilidades de ocorrência dos modelos geológicos representativos: o método das nuvens, o método dos ramos e o método das distâncias. Esses métodos são discutidos após a apresentação dos resultados.

3.1.9.1 Método das Nuvens

O método das nuvens sugere que a probabilidade de ocorrência de cada modelo representativo seja o somatório das probabilidades dos modelos que estão presentes no interior de cada círculo, representado por um determinado modelo representativo no gráfico do Valor Presente Líquido (VPL) *versus* Fator de Recuperação (FR). Este método é caracterizado por ser um pouco subjetivo, já que a colocação e a distribuição de cada círculo no gráfico VPL *versus* FR podem variar, influenciando o resultado do cálculo do VDI. A Figura 3.4 mostra que a probabilidade do MGR 1 (caso base) é o somatório das probabilidades dos modelos indicados pelas setas, considerando o cálculo do valor da informação com 6 modelos representativos. O cálculo é mostrado abaixo:

$$P_{MGR1} = \sum P_{Circulo\ i} = 0,1728 + 0,0192 + 0,0576 + 0,0192 + 0,0064 + 0,0192 + 0,0064 + 0,0432 + 0,0048 + 0,0144 + 0,0048 + 0,0016 + 0,0144$$

$$P_{MGR1} = \sum P_{Circulo\ i} = 0,3840$$

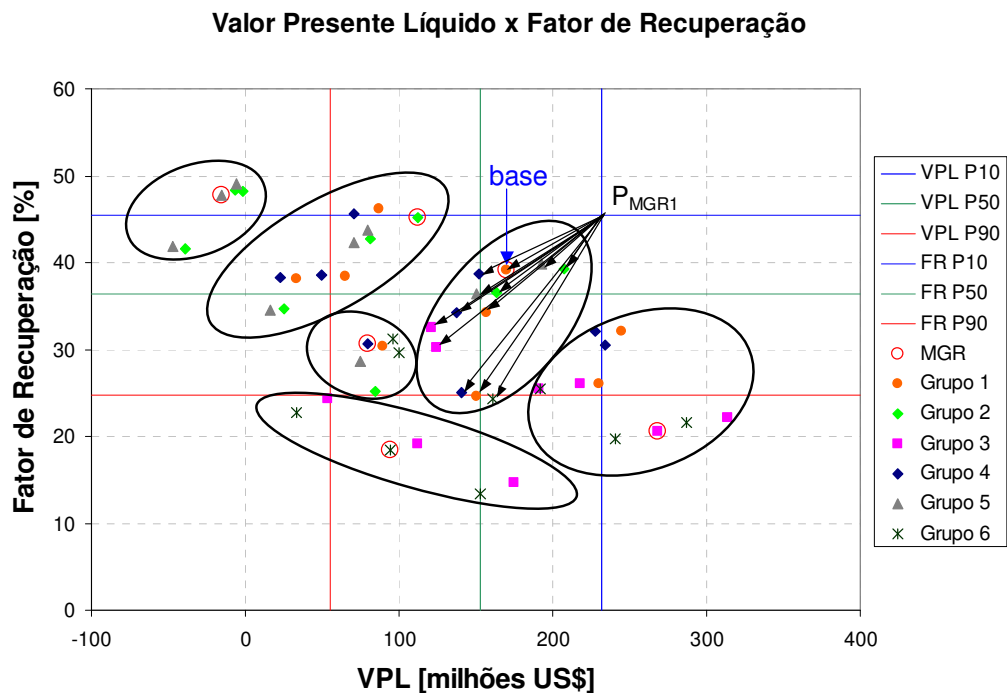


Figura 3.4. Cálculo da probabilidade de ocorrência dos MGR pelo método das nuvens.

3.1.9.2 Método dos Ramos

As probabilidades correspondentes aos MGR calculados a partir do método dos ramos correspondem à multiplicação das probabilidades presentes nos ramos dos atributos passíveis de redução de incerteza do determinado MGR. Caso haja mais de um modelo por grupo de ramificações (no exemplo apresentado, são 6 grupos), as probabilidades dos mesmos devem ser ponderadas e distribuídas através da multiplicação das probabilidades dos ramos subsequentes, ou seja, através da multiplicação das probabilidades dos atributos definidos como não passíveis de redução de incerteza obtendo-se a informação. A Figura 3.5 e a Tabela 3.1 mostram o cálculo dos MGR de 1 a 7, considerando-se que o cálculo do valor da informação foi realizado com 7 modelos representativos.

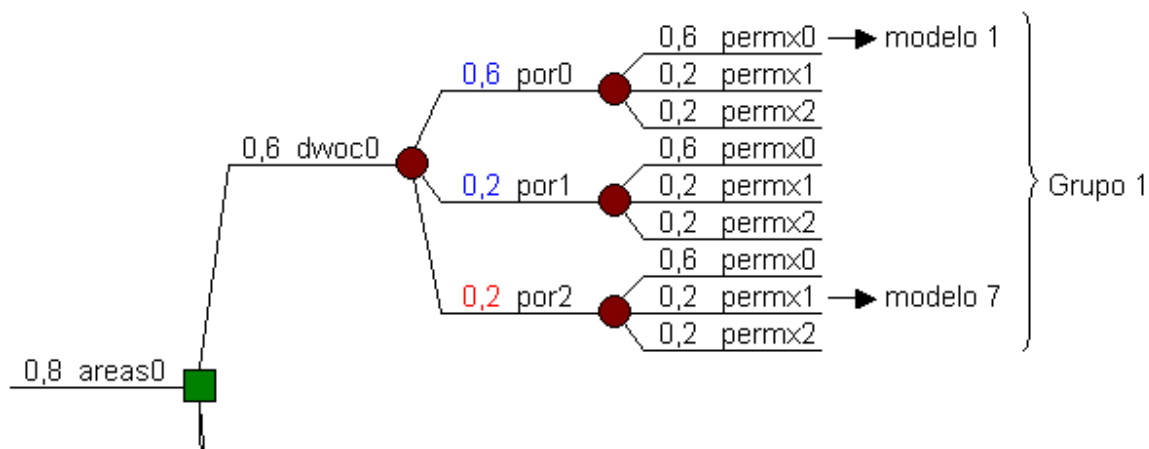


Figura 3.5. Exemplo de cálculo das probabilidades dos MGR 1 e 7 pelo método dos ramos (a figura representa parte da árvore na vertical e o grupo 1 é representado por 2 MGR).

Tabela 3.1. Exemplo de cálculo das probabilidades dos MGR 1 a 7 pelo método dos ramos.

Grupo 1	$MGR_1 = 0,8 \cdot 0,6 \cdot (0,6 + 0,2) = 0,384$
Grupo 2	$MGR_2 = 0,8 \cdot 0,2 = 0,160$
Grupo 3	$MGR_3 = 0,8 \cdot 0,2 = 0,160$
Grupo 4	$MGR_4 = 0,2 \cdot 0,6 = 0,120$
Grupo 5	$MGR_5 = 0,2 \cdot 0,2 = 0,040$
Grupo 6	$MGR_6 = 0,8 \cdot 0,2 = 0,040$
Grupo 7	$MGR_7 = 0,8 \cdot 0,6 \cdot (0,2) = 0,096$

3.1.9.3 Método das Distâncias

O método das distâncias pondera a representatividade de cada modelo representativo, de acordo com a proximidade do mesmo em relação aos demais modelos, ou seja, a probabilidade de cada MGR será proporcional ao inverso do quadrado das distâncias normalizadas em relação a todos os outros modelos no gráfico do VPL *versus* FR. A probabilidade de ocorrência de um dado modelo representativo (MGR variando de 1 a “ n_{MGR} ”), considerando “N” modelos ou cenários possíveis, é:

$$P(MGR_i) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^{n_{MGR}} \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_i \quad (3.12)$$

onde: $P_{\text{modelo escolhido } j}$ – probabilidade do modelo j escolhido como um MGR

N – número total de modelos

j – índice que varia de 1 a N

n_{MGR} – número de modelos geológicos representativos

i – índice que varia de 1 a n_{MGR}

F – fator multiplicador ($F = 0$ quando j é um modelo geológico representativo e $F = 1$ quando j não é um modelo geológico representativo), e:

$$\sum_{i=1}^{n_{MGR}} P(MGR_i) = 1 \quad (3.13)$$

Um exemplo do cálculo das probabilidades dos MGR está demonstrado na Tabela 3.2, considerando que o cálculo do valor da informação foi realizado com 6 modelos geológicos representativos. Este método pondera as probabilidades de ocorrência de todos os modelos em relação aos modelos representativos. Quanto maior o número de representativos, menor a influência de cada modelo em cada modelo representativo, ou seja, a representatividade de cada modelo é subdividida entre todos os modelos representativos. O fator “ F ” é utilizado para anular o cálculo do peso do próprio MGR em que a distância do modelo com relação a ele mesmo é nula, tornando seu peso infinitamente maior. Por isso, a probabilidade do próprio modelo é somada separadamente na Equação 3.12.

Tabela 3.2. Exemplo de cálculo das probabilidades dos MGR 1 a 6 pelo método das distâncias.

$P(\text{MGR}_1) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^{54} \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_1 = 0,1728 + 0,1905 = 0,3633$
$P(\text{MGR}_2) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^{54} \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_2 = 0,0192 + 0,1581 = 0,1773$
$P(\text{MGR}_3) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^{54} \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_3 = 0,0192 + 0,0963 = 0,1155$
$P(\text{MGR}_4) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^{54} \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_4 = 0,0144 + 0,1703 = 0,1847$
$P(\text{MGR}_5) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^{54} \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_5 = 0,0048 + 0,0692 = 0,0740$
$P(\text{MGR}_6) = P_{\text{modelo escolhido } j} + \sum_{j=1}^{54} \left(\frac{F \frac{P_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{d_j^2} \right)_j} \right)_6 = 0,0048 + 0,0804 = 0,0852$

3.1.10 Cálculo do valor da informação

O valor da informação é dado pela diferença dos VME com e sem informação:

$$VOI = VME_{CI} - VME_{SI} \quad (3.14)$$

A fórmula geral de cálculo dos VME válida para ambos os métodos propostos (método da árvore completa e método dos MGR) é representado pela Equação 3.3 reescrita abaixo:

$$VME = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{EST}} \left[\sum_{\ell=1}^{N_G} \left(VPL_{\text{estratégia}(w), \text{modelo}_\ell} \right) \cdot P_\ell \right] \right\}_{(k)} \quad (3.15)$$

Considerando o método da árvore completa para $G = 1$ e $N_G = N$ a Equação 3.15 torna-se o VME_{SI} . Para $G > 1$ a equação torna-se o VME_{CI} . Considerando o método em que a árvore é representada de forma simplificada pelos MGR para $G = 1$ e $N_G = n_{MGR}$ a equação torna-se o VME_{SI} . Para $G > 1$ a equação torna-se o VME_{CI} .

Capítulo 4

Aplicações e Resultados

Neste capítulo, são apresentados a aplicação da metodologia proposta e seus respectivos resultados, obtidos em três exemplos estudados. Cada exemplo segue passo a passo a metodologia proposta, com exceção dos dois primeiros exemplos, em que não há necessidade da obtenção dos modelos geológicos representativos por causa da simplicidade da árvore de decisão, caracterizada por possuir poucas ramificações, ou seja, poucos cenários possíveis. Nesses exemplos simples, na verdade pela simplicidade do caso, os modelos representativos são resultado de todas as combinações dos atributos incertos.

4.1 Exemplos I e II

Este item contém a exemplificação da metodologia de cálculo do valor da informação através de dois exemplos teóricos – assumindo algumas hipóteses para simplificar o processo de cálculo –, elaborados com o intuito de explicitar e comparar didaticamente os conceitos de valor da informação e de flexibilização.

Para facilitar o entendimento dos conceitos de Valor de Informação (VDI) e de Valor de Flexibilização (VDF), são apresentados dois modelos de reservatório simplificados, denominados de Exemplo I (Figura 4.1) e Exemplo II (Figura 4.2). Ambos os exemplos correspondem a reservatórios retangulares (dimensão em metros de cada bloco nas direções x, y e z: 70 x 70 x 30)

e homogêneos em suas propriedades de rocha (porosidade e permeabilidade), apresentando um único atributo incerto: a área e, conseqüentemente, o volume de óleo originalmente *in situ* (VOOIS). Desse modo, a incerteza relacionada a este parâmetro pode ser reduzida ou eliminada através da obtenção de novas informações, por exemplo, perfurando-se um poço (custo de perfuração de um poço: 12 milhões de dólares).

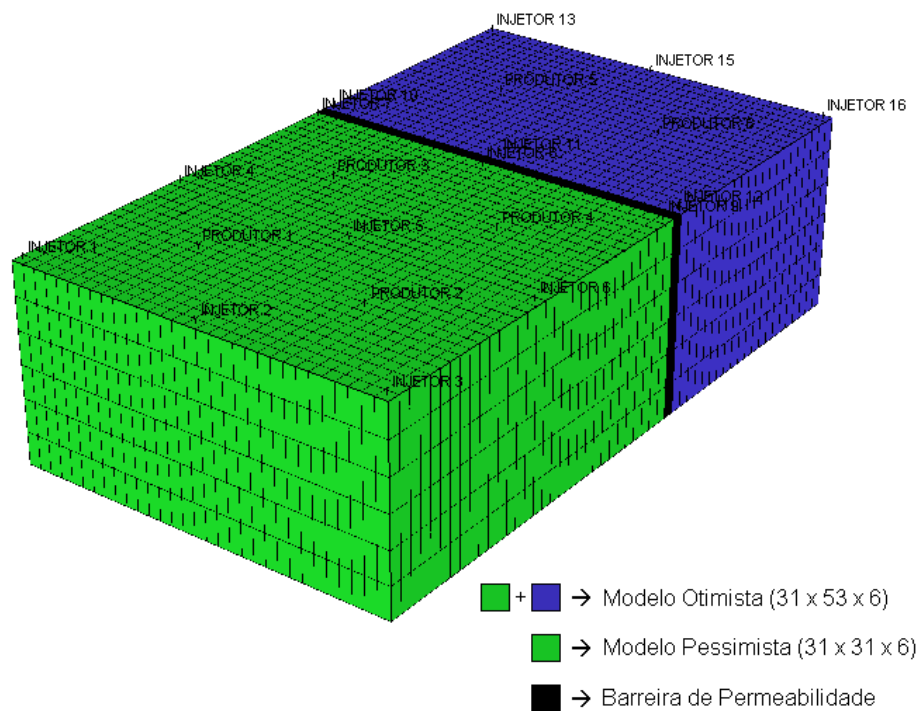


Figura 4.1. Modelo de reservatório com incerteza – Exemplo I.

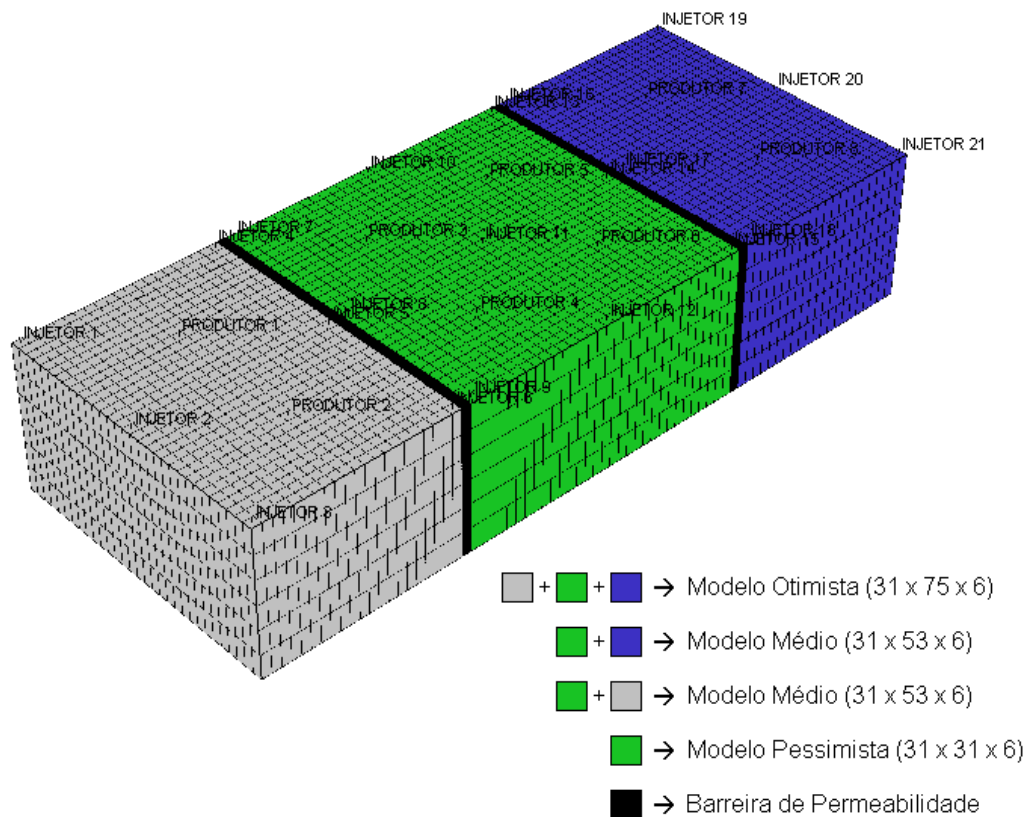


Figura 4.2. Modelo de reservatório com incerteza – Exemplo II.

Os parâmetros operação e monitoração de produção e injeção dos poços produtores e injetores verticais são:

- Mínima pressão de operação no fundo do poço: 60 kgf/cm²;
- Máxima produção de água de 90% da vazão total;
- Completação nas três camadas superiores, com canhoneio efetivo de 30% da espessura da camada;
- Máxima vazão de injeção de água: 2000 m³/dia.

Os dados econômicos necessários para o cálculo de VDI e VDF estão indicados na Tabela 4.1. O custo do sistema produtivo foi considerado como uma função linear do número de poços perfurados, conforme ilustrado na Figura 4.3.

Tabela 4.1. Dados econômicos necessários para o cálculo de VDI e VDF.

Taxa de injeção de água por injetor [m ³ /dia]	2000
Taxa de juros [%]	15
Taxas Governamentais [%]	45
Investimento inicial [milhões US\$]	50
Custo por poço vertical [milhões US\$]	12
Preço do óleo [US\$/m ³]	113
Preço do gás [US\$/10 ³ m ³]	113
Custo de produção do óleo [US\$/m ³]	37,70
Custo de produção da água [US\$/m ³]	12,60
Custo de injeção de água [US\$/m ³]	1,94

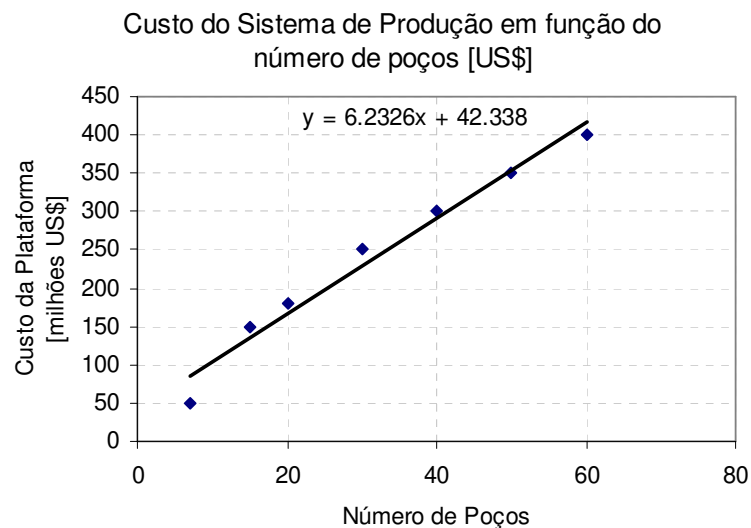


Figura 4.3. Custo do sistema de produção em função do número de poços (modificado de: Revista Brasil Energia).

4.1.1 Exemplo I

A Figura 4.1 ilustra o modelo do Exemplo I, em que uma barreira de permeabilidade divide o reservatório em duas áreas distintas: uma representando um modelo otimista, com 31x53x6 blocos, e a outra representando o modelo pessimista, com 31x31x6 blocos. A probabilidade de ocorrência de cada um destes modelos foi admitida inicialmente como sendo de 50%.

Uma análise foi realizada para constatar se a informação a ser obtida para eliminar a dúvida quanto à área do reservatório seria justificável financeiramente. Para tanto, o problema recebeu três enfoques distintos: (1) obtenção da informação, independente do fato de a mesma ser positiva ou negativa, reduzindo a incerteza da variável área; (2) flexibilizar a estratégia e o sistema produtivo do projeto (tipo e tamanho de plataforma, número de poços produtores e injetores, capacidade de produção de óleo e água e capacidade de injeção de água) para um caso em que o volume de óleo *in situ* seja grande (otimista) ou pequeno (pessimista); e (3) não obter informação e não flexibilizar o sistema, definindo uma estratégia fixa de produção para os casos otimista e pessimista.

O processo de determinação do VDI e do VDF depende de como as informações e flexibilizações são utilizadas para melhorar o desempenho do reservatório. No caso deste exemplo, isto foi feito através do processo de otimização da estratégia de produção, que foi admitida como sendo do tipo *five spot invertido*⁹. Para o modelo pessimista, a otimização da estratégia levou a um número de poços igual a 13, enquanto que, para o modelo otimista, foi encontrado um número ótimo de 21 poços. A otimização da estratégia de produção sem informação e sem flexibilização foi um pouco mais complexa, sendo necessário encontrar a estratégia que maximizava o valor monetário esperado (VME). Para o caso em estudo, o número ótimo de poços deveria estar compreendido entre 13 e 21, como, por exemplo, uma estratégia intermediária com 16 poços. A Tabela 4.2 mostra as características da estratégia de produção para os modelos de reservatório otimista e pessimista. A árvore de derivação para o Exemplo I, Figura 4.4, ilustra as opções de obtenção ou não de informação e de flexibilização. De acordo com a nomenclatura adotada, VME_{CI} e VME_{CF} representam o valor monetário esperado com informação e com flexibilização, respectivamente. O valor monetário esperado sem informação é denotado por VME_{SI} . Nota-se que as ramificações com informação e flexibilização são idênticas e, conseqüentemente, possuem os mesmos valores de VME, pelo fato de a informação obtida ser considerada perfeita e completa, retirando toda a dúvida a respeito da área incerta, e a flexibilização ser total, ou seja, possibilitando qualquer estratégia de produção.

⁹ Configuração com um poço produtor e quatro poços injetores.

Tabela 4.2. Características dos modelos otimista e pessimista do Exemplo I.

	Modelo Otimista Estratégia Otimizada com 21 Poços	Modelo Pessimista Estratégia Otimizada com 13 Poços
Dimensões do modelo [blocos]	31 x 53 x 6	31 x 31 x 6
VOOIS [milhões m ³]	246	144
Nº Produtores	6	4
Nº Injetores de água	15	9
Custo do sistema produtivo ¹⁰ [milhões US\$]	173	123

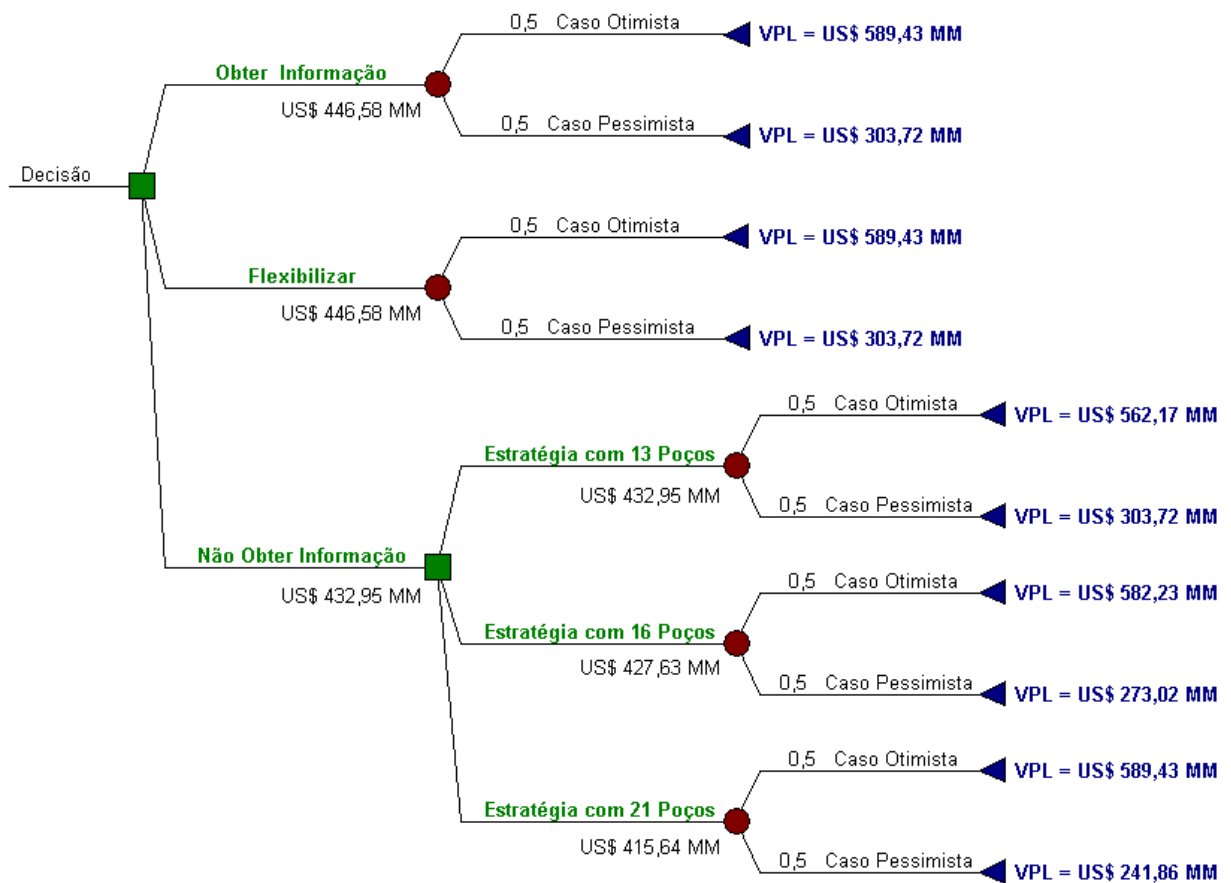


Figura 4.4. Árvore de decisão para o Exemplo I.

¹⁰ Conforme Figura 4.3.

4.1.1.1 Cálculo do VME_{SI}

O VME_{SI} corresponde ao máximo VME obtido para o reservatório com uma determinada estratégia fixa. A variação de estratégia deve ser feita desde a estratégia do caso pessimista otimizado (13 poços) até a estratégia do caso otimista otimizado (21 poços). O fato de não se obter a informação e nem flexibilizar o sistema resulta numa estratégia única, independente do tamanho do reservatório.

$$VME_{SI} = \text{US\$ } 432,95 \text{ milhões} \quad (4.1)$$

4.1.1.2 Cálculo do VME_{CI}

O VME_{CI} corresponde aos VPL calculados nos casos otimista e pessimista, multiplicados pelas respectivas probabilidades de ocorrência:

$$\begin{aligned} VME_{CI} &= VPL_{\text{otimista}} \cdot p + VPL_{\text{pessimista}} \cdot (1 - p) \\ VME_{CI} &= 589,43 \cdot 0,5 + 303,72 \cdot 0,5 = \text{US\$ } 446,58 \text{ milhões} \end{aligned} \quad (4.2)$$

4.1.1.3 Cálculo do VDI

O valor da informação é obtido a partir da subtração do VME_{CI} e do VME_{SI} :

$$VDI = 446,58 - 432,95 = \text{US\$ } 13,63 \text{ milhões} \quad (4.3)$$

4.1.1.4 Cálculo do VDF

O valor da flexibilização foi obtido da mesma maneira que o valor da informação:

$$\text{VDF} = 446,58 - 432,95 = \text{US\$ } 13,63 \text{ milhões} \quad (4.4)$$

É importante observar que não houve diferença entre os valores VDI e VDF, pois as probabilidades de ocorrência dos atributos são iguais, e a informação eliminou qualquer tipo de dúvida com relação à incerteza da área, ou seja, a informação foi completa.

Avaliando-se o valor da informação e da flexibilização, uma comparação entre os custos de cada opção pode ser feita. A determinação dos custos de forma detalhada pode ser uma tarefa complexa. Neste trabalho, que tem como objetivo mostrar os conceitos de VDI e VDF, o custo considerado foi apenas o de um poço adicional. Neste exemplo, em que os valores da informação e da flexibilização são iguais, deve-se escolher a opção de menor custo. Como exemplo, se o custo da informação (CDI) fosse contabilizado somente pelo valor do poço adicional (US\$ 12 milhões), e se não houvesse possibilidade de optar pela flexibilização total, pois há uma grande diferença entre número de poços das opções ótimas, a opção de adquirir a informação deveria ser escolhida.

A Figura 4.5 mostra uma comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI), em função da probabilidade de ocorrência da área incerta. Pode-se observar que, para as probabilidades menores que 44% e maiores que 80%, o valor da informação é menor ou igual ao seu custo, resultando na opção de rejeição da informação. Para valores que estejam neste intervalo, a obtenção da informação seria a melhor opção, especialmente para valores próximos de 60%, em que a informação alcança seu valor máximo. Deve-se observar que para 100% de chance de ocorrência da área incerta, o valor da informação é nulo porque há a certeza de que a área existe, de maneira que a obtenção da informação não traria benefícios à definição da estratégia de produção. O mesmo vale para o caso em que a probabilidade de ocorrência é zero, ou seja, não há chance de que a área exista, então o VDI é nulo também.

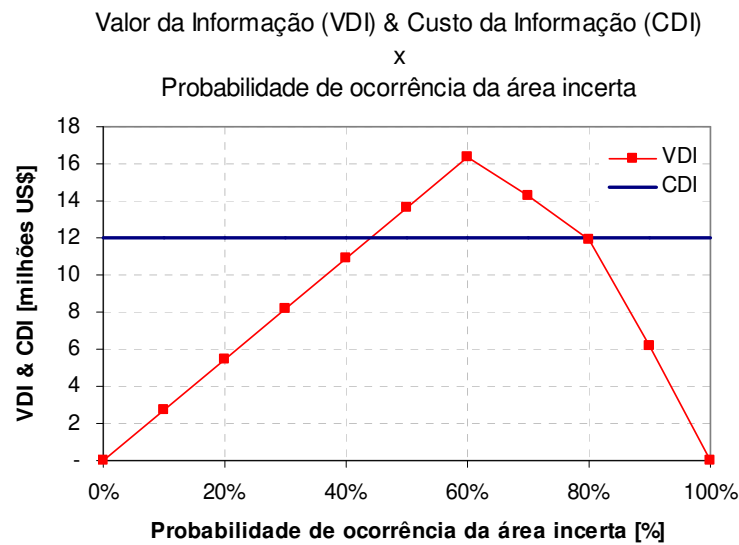


Figura 4.5. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) em função da probabilidade de ocorrência da área incerta.

4.1.2 Exemplo II

O Exemplo II, Figura 4.2, é semelhante ao Exemplo I, entretanto com mais uma área incerta. Portanto, a distribuição de probabilidade de ocorrência da área incerta foi discretizada em quatro níveis: um otimista (25%), um médio (25%), outro médio idêntico (25%) e outro pessimista (25%). A estratégia de produção do modelo que possui a maior área (caso otimista), correspondente à área conhecida mais duas áreas descobertas pela perfuração de dois poços, foi otimizada com 29 poços possuindo o maior CAPEX. A estratégia correspondente ao caso médio, em que somente uma área adicional supostamente existe, foi otimizado com 21 poços. O reservatório com a área conhecida (caso pessimista) possui uma estratégia de produção otimizada com 13 poços com o menor CAPEX. É importante observar que, em todos os modelos, os poços produtores e injetores foram dispostos com configuração do tipo *five spot invertido*.

Este exemplo também explicita a incerteza de um atributo: no caso, a área. Pode-se, novamente, dividir o problema em três opções: (1) escolha da obtenção das informações (dois poços perfurados), independente do fato de as mesmas serem positivas ou negativas, reduzindo a

incerteza da variável área; (2) flexibilizar a estratégia e o sistema produtivo do projeto (tipo de plataforma, número de poços produtores e injetores, capacidade de produção de óleo e água e capacidade de injeção de água) para um caso em que o volume de óleo *in situ* seja otimista, médio ou pessimista; e (3) a opção sem informação, ou seja, não obter a informação e não flexibilizar o sistema, definindo uma estratégia fixa de produção para os casos otimista, médio e pessimista. A Tabela 4.3 mostra as características da estratégia de produção para cada um dos possíveis modelos do Exemplo II. A Figura 4.6, a Figura 4.7 e a Figura 4.8 mostram a árvore de decisão para o Exemplo II.

Tabela 4.3. Características dos modelos otimista, médio e pessimista do Exemplo II.

	Modelo Pessimista Estratégia Otimizada com 13 Poços	Modelo Provável Estratégia Otimizada com 21 Poços	Modelo Otimista Estratégia Otimizada com 29 Poços
Dimensões do modelo (blocos)	31 x 31 x 6	31 x 53 x 6	31 x 75 x 6
VOOIS [milhões m ³]	144	246	349
Nº Produtores	4	6	8
Nº Injetores de água	9	15	21
Custo do sistema produtivo ¹¹ [milhões US\$]	123	173	223



Figura 4.6. Ramificação da árvore de decisão para o exemplo II – Com flexibilização.

¹¹ Conforme Figura 4.3.

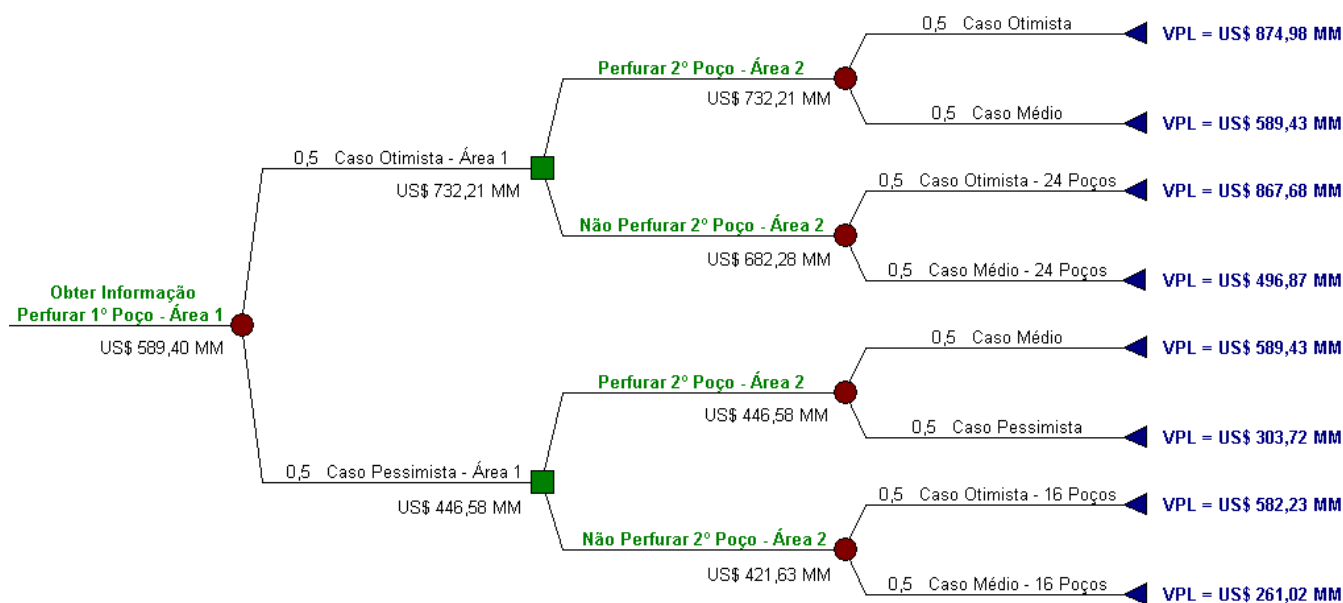


Figura 4.7. Ramificação da árvore de decisão para o Exemplo II – Com informação.

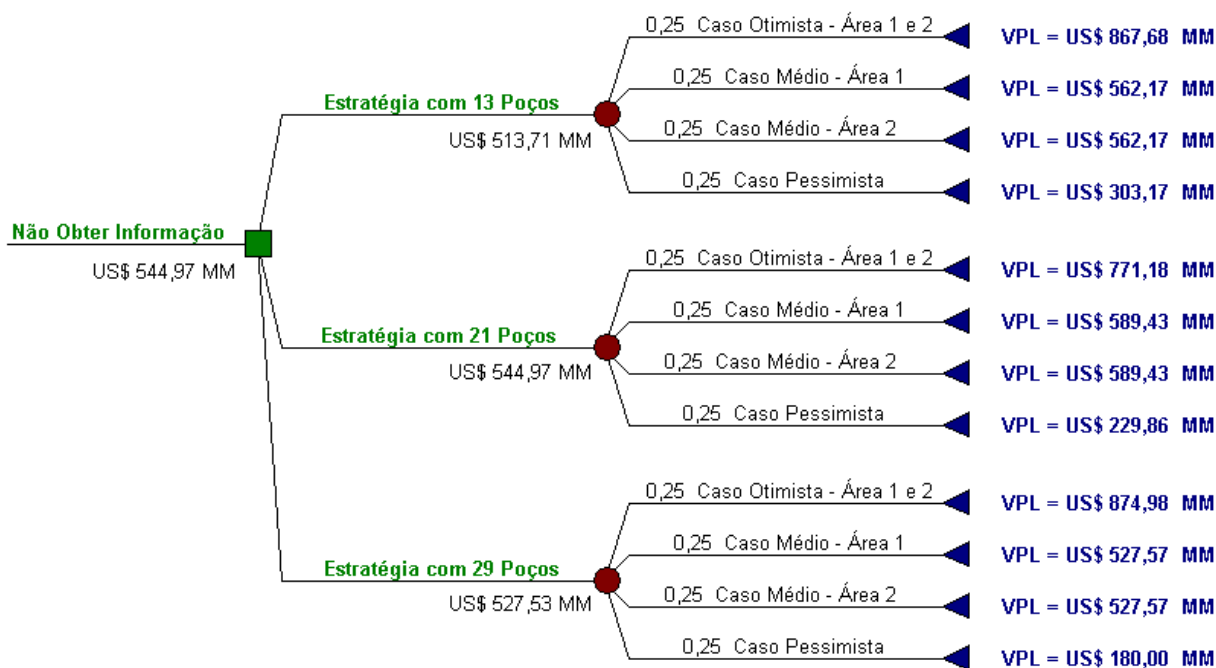


Figura 4.8. Ramificação da árvore de decisão para o Exemplo II – Sem informação.

4.1.2.1 Cálculo do VME_{SI}

Conforme indicado no Exemplo I, o VME_{SI} obtido no caso sem informação corresponde ao máximo VME obtido para o reservatório com uma determinada estratégia fixa, a qual deve estar compreendida entre a estratégia de produção do modelo pessimista otimizado (13 poços), o modelo médio otimizado (21 poços) e o modelo otimista otimizado (29 poços).

$$VME_{SI} = \text{US\$ } 544,97 \text{ milhões} \quad (4.5)$$

4.1.2.2 Cálculo do VME_{CI}

$$\begin{aligned} VME_{CI} &= VPL_{\text{otimista}} \cdot p + VPL_{\text{pessimista}} \cdot (1-p) + 2 \cdot VPL_{\text{Médio}} \cdot p \cdot (1-p) \\ VME_{CI} &= 874,98 \cdot 0,25 + 303,72 \cdot 0,25 + 2 \cdot 589,43 \cdot 0,25 = \text{US\$ } 589,39 \text{ milhões} \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.1.2.3 Cálculo do VDI

$$VDI = 589,39 - 544,97 = \text{US\$ } 44,42 \text{ milhões} \quad (4.7)$$

4.1.2.4 Cálculo do VDF

$$VDF = 589,39 - 544,97 = \text{US\$ } 44,42 \text{ milhões} \quad (4.8)$$

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 mostram uma comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) em função da probabilidade de ocorrência das áreas incertas, considerando que as mesmas possuem probabilidades iguais. Pode-se observar que, no caso da obtenção de duas informações (Figura 4.9) para probabilidades menores que 24% e maiores que 80%, o VDI é menor ou igual ao seu custo, resultando na opção de rejeição da informação. Para valores compreendidos neste intervalo, a obtenção da informação seria a melhor opção,

especialmente para valores próximos de 40% e 60%, nos quais a informação alcança os maiores valores. Já para o caso da obtenção de uma informação apenas (Figura 4.10), o intervalo em que o CDI é inferior ao VDI é significativamente menor, se comparado ao intervalo da Figura 4.9.

A Figura 4.11 e a Figura 4.12 mostram a variação do valor da informação em função da variação da probabilidade de ocorrência de uma das áreas incertas, considerando o valor da probabilidade de ocorrência da outra área incerta constante e igual a 30%. Observa-se que o valor da informação é muito sensível às probabilidades de ocorrência de cada área incerta, como mostra a Figura 4.11. Observa-se também que a obtenção da primeira informação, Figura 4.12, ou seja, a opção de perfurar o primeiro poço para a constatação da presença de óleo, mostrou-se, na maioria dos casos, menor que o seu custo de obtenção. Este fato pode ser justificado pela concentração das maiores probabilidades de ocorrência nos casos intermediários que são semelhantes, e em que a variação do volume do modelo pessimista em relação ao otimista mostrou-se superior, mais que o dobro, de maneira que a incerteza em relação à área não seja suficientemente diminuída ou eliminada com a obtenção de somente uma informação neste caso. Isto não significa que se deva generalizar que a obtenção da primeira informação não vale a pena.

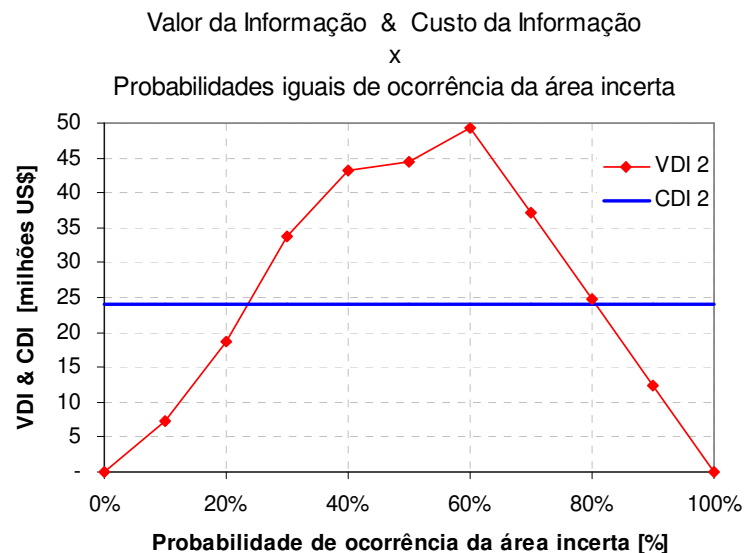


Figura 4.9. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para probabilidades iguais de ocorrência das áreas incertas P_1 e P_2 , considerando duas informações obtidas.

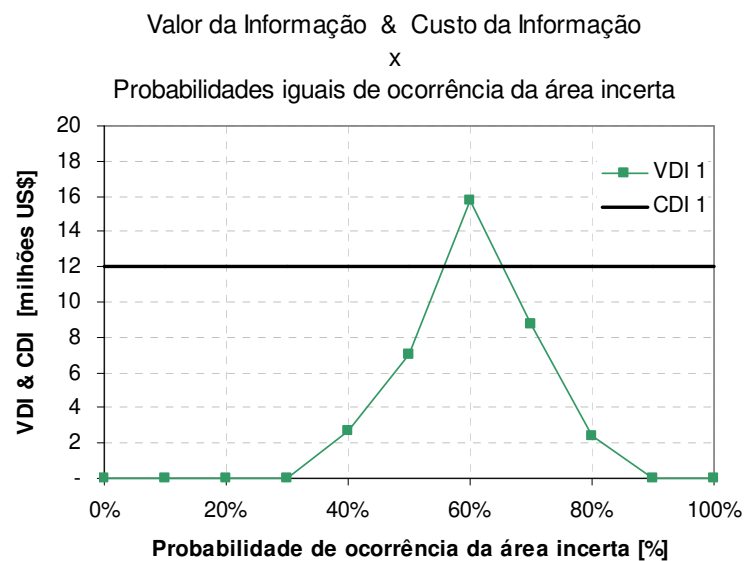


Figura 4.10. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para probabilidades iguais de ocorrência das áreas incertas P_1 e P_2 , considerando somente uma informação obtida.

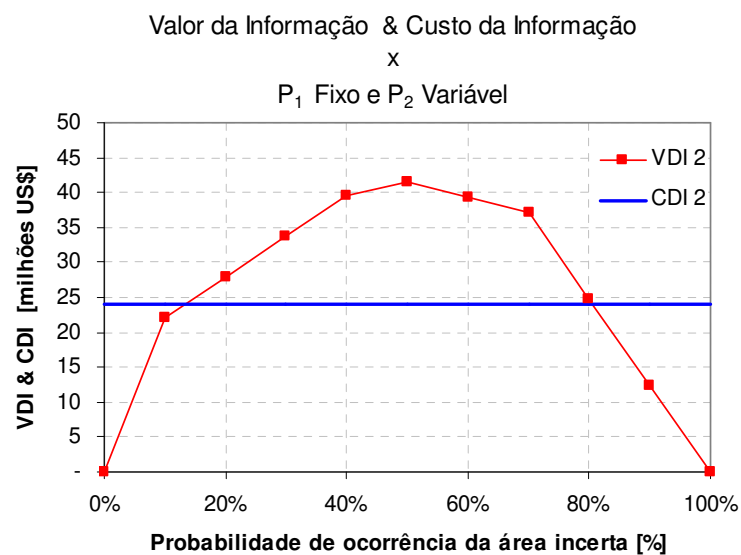


Figura 4.11. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para diferentes probabilidades de ocorrência das áreas incertas, considerando duas informações obtidas.

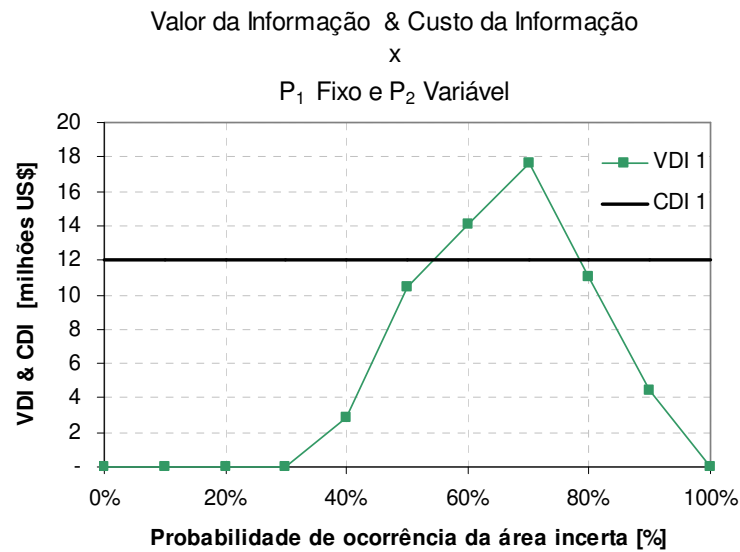


Figura 4.12. Comparação entre o valor da informação (VDI) e o custo da informação (CDI) para diferentes probabilidades de ocorrência das áreas incertas, considerando somente uma informação obtida.

4.2 Exemplo III

O caso que será mostrado a seguir corresponde a um modelo modificado, tendo como base um reservatório marítimo (campo de Namorado modificado) localizado na Bacia de Campos, Brasil, situado em lâmina de água média de 170 m. O campo está em fase de avaliação e desenvolvimento, em que somente um poço exploratório foi perfurado (neste caso, com a presença de óleo), havendo ainda muitas incertezas a seu respeito, ou seja, uma quantidade de informações razoável em relação ao reservatório é desconhecida.

Para o modelo numérico, foi adotada uma malha de 51x28x6, resultando num total de 8.568 blocos, em que cerca de 60% deles são ativos, conforme o modelo. Cada bloco tem as dimensões areais de 150 x 150 m, com espessuras variáveis. A Figura 4.13 apresenta uma vista tridimensional do reservatório.

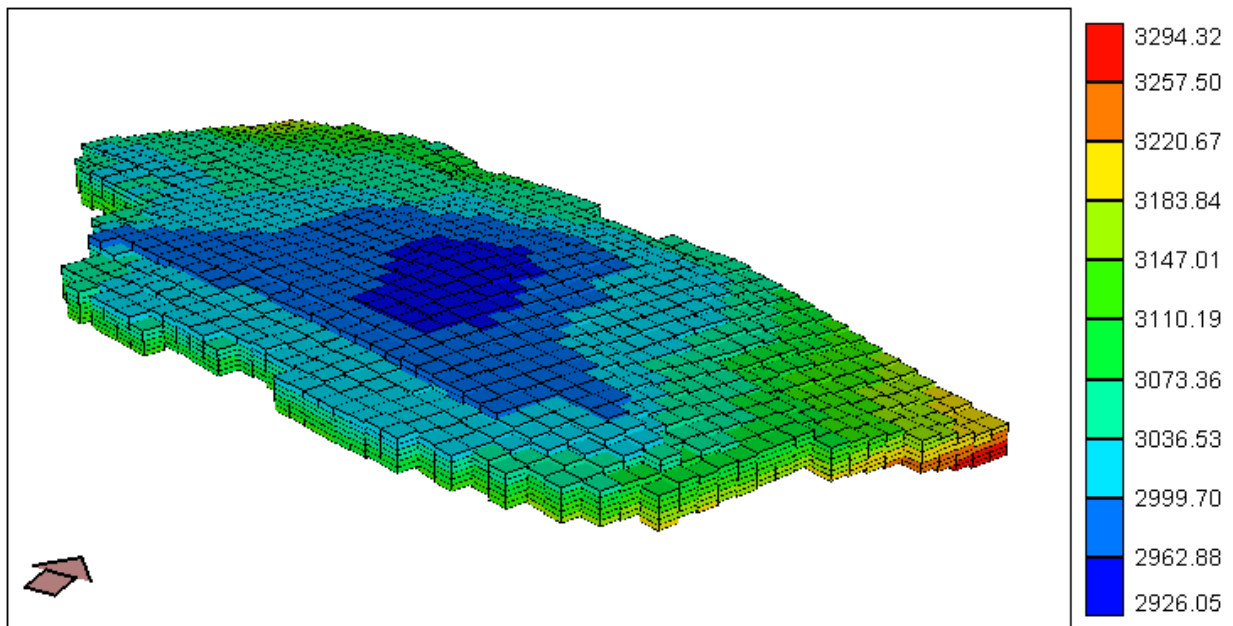


Figura 4.13. Mapa de topo [m] da malha de simulação.

Os parâmetros operação e monitoração da produção dos poços produtores verticais são:

- Máxima vazão de produção de líquido: 1500 m³/dia;
- Mínima pressão de operação no fundo do poço: 100 kgf/cm²;
- Mínima vazão de óleo: 50 m³/dia;
- Máxima razão gás-óleo de produção de 200 m³/m³, com conseqüente recompletação abaixo da camada com maior produção de gás;
- Máxima produção de água de 80% da vazão total, com conseqüente recompletação acima da camada com maior produção de água;
- Completação nas três camadas superiores, com canhoneio efetivo de 30% da espessura da camada.

Para os poços produtores horizontais, são:

- Máxima vazão de produção de líquido: 2500 m³/dia;
- Mínima pressão de operação no fundo do poço: 100 kgf/cm²;
- Mínima vazão de óleo: 50 m³/dia;
- Máxima produção de água de 90% da vazão total;
- Máxima razão gás-óleo de produção de 200 m³/m³.

E para os poços injetores horizontais, são:

- Máxima vazão de injeção de água: 2200 m³/dia;
- Máxima pressão de operação no fundo do poço de 300 kgf/cm².

Os parâmetros necessários para a realização dos cálculos econômicos estão indicados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Parâmetros para análise econômica.

Taxa de juros [%]	15
Taxas Governamentais [%]	45
Investimento inicial [milhões US\$]	120
Custo por poço [milhões US\$]	15
Preço do óleo [US\$/m ³]	113
Preço do gás [US\$/10 ³ m ³]	113
Custo de produção do óleo [US\$/m ³]	20
Custo de produção da água [US\$/m ³]	10
Custo de injeção de água [US\$/m ³]	10

4.2.1 Definição dos atributos incertos

Os atributos incertos, seus níveis e probabilidades de ocorrência considerados para este modelo estão relacionados na Tabela 4.5. Foi admitida total independência entre os atributos, ou seja, todas as combinações de atributos na construção de um modelo de reservatório são possíveis.

Tabela 4.5. Atributos incertos.

Atributos	Níveis	Probabilidade
Porosidade	por0	0.6
	por1 = por0 * 0.7	0.2
	por 2 = por0 * 1.4	0.2
Permeabilidade Horizontal	permx0	0.6
	permx 1 = permx0 * 0.5	0.2
	permx2 = permx0 * 2.0	0.2
Permeabilidade Vertical	permz0	0.6
	permz1 = permz0 * 2.5	0.2
	permz2 = permz0 * 0.4	0.2
Compressibilidade da Rocha	cpor0	0.6
	cpor1 = cpor0 * 0.8	0.2
	cpor0 = cpor0 * 1.2	0.2
Modelo Estrutural	areas0	0.6
	areas1	0.2
	areas2	0.2
Análise PVT	pvt0	0.6
	pvt1	0.2
	pvt2	0.2
Curva de Permeabilidade Relativa óleo-água	kro0	0.6
	kro1	0.2
	kro2	0.2
Contato óleo-água	dwoc0 = 3100 m	0.6
	dwoc1 = 3075 m	0.2
	dwoc2 = 3210 m	0.2

O modelo estrutural apresenta três diferentes níveis, variando-se os volumes de rocha e fluido. A Figura 4.14 compara os modelos estruturais.

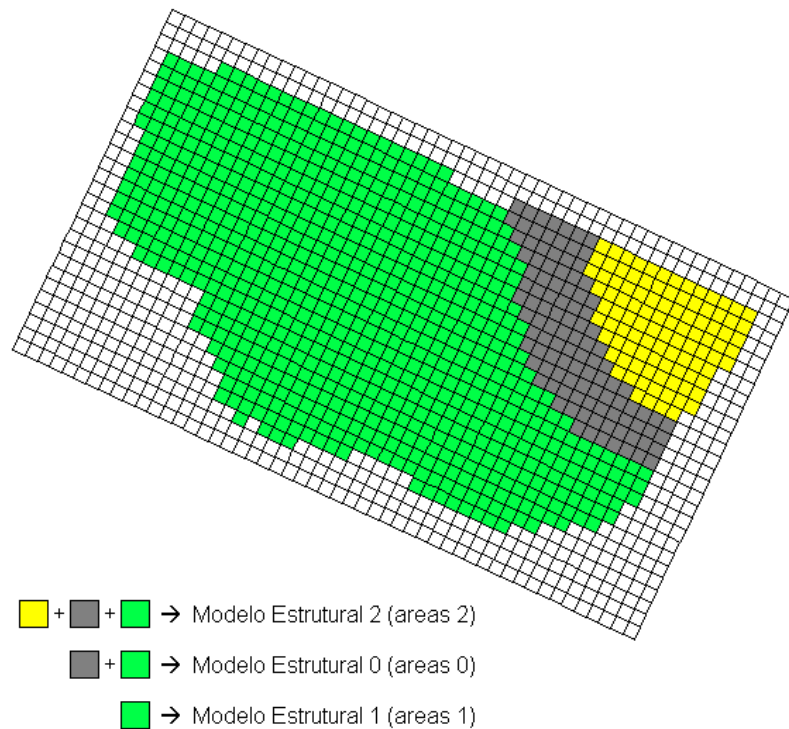


Figura 4.14. Diferenciação entre os níveis do atributo modelo estrutural (areas).

O atributo volume poroso agrega a incerteza não só quanto à porosidade, mas também quanto ao volume de rocha do reservatório. Um mapa determinístico foi elaborado para as permeabilidades horizontal e vertical, considerado como o mais provável. Os demais níveis são obtidos por fatores multiplicadores aplicados a todo o mapa. A compressibilidade da rocha foi tratada como uniforme para todo o reservatório e o seu valor mais provável foi de $50 \cdot 10^{-6} \text{ [kgf/cm}^2\text{]}^{-1}$. Os dados das análises PVT e as curvas de permeabilidade relativa podem ser vistos no Anexo 2.

4.2.2 Composição do caso base

Após a elaboração de um modelo em três dimensões do reservatório em um simulador de fluxo, uma estratégia de produção inicial para um modelo base, considerado o modelo mais provável, já havia sido selecionada *a priori*. Embora a mesma não estivesse otimizada,

inicialmente era composta por 19 poços (12 produtores, dentre eles 4 verticais e 8 horizontais, e 7 injetores horizontais), como mostram a Tabela 4.6 e a Figura 4.15.

Tabela 4.6. Disposição dos poços produtores e injetores.

	Poços	Disposição	Completação - Camada
Produtores	PO - 001	Vertical	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
	PO - 002		1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
	PO - 003		1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
	AA - 119		1 ^a , 2 ^a , 3 ^a , 4 ^a , 5 ^a , 6 ^a
	PO - 004	Horizontal	1 ^a
	PO - 005		1 ^a
	PO - 006		1 ^a
	PO - 007		1 ^a
	PO - 008		1 ^a
	PO - 010		1 ^a
	PO - 013		1 ^a
	PO - 014		1 ^a
Injetores	PI - 009		6 ^a
	PI - 015		6 ^a
	PI - 016		6 ^a
	PI - 017		6 ^a
	PI - 018		6 ^a
	PI - 019		6 ^a
	PI - 020		6 ^a

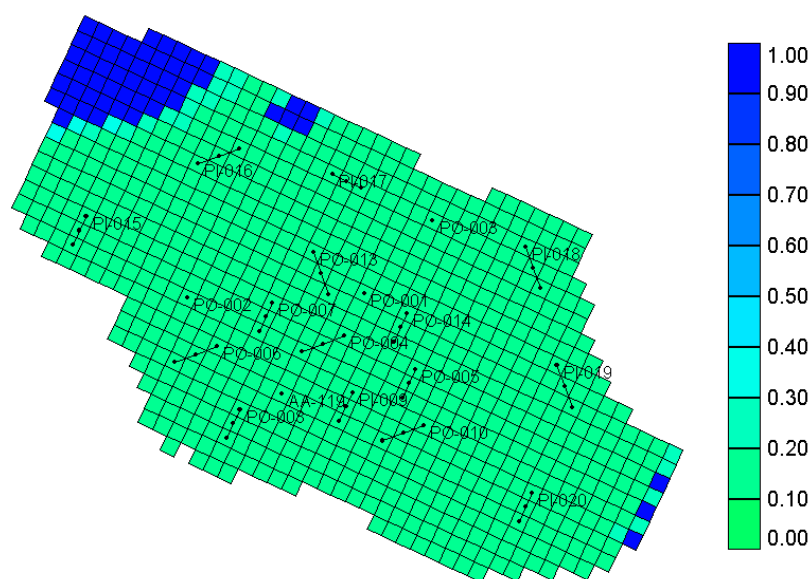


Figura 4.15. Estratégia inicial para o caso base (mapa de saturação de água).

4.2.3 Otimização da estratégia para o caso base

O processo de otimização utilizado no modelo base e dos demais modelos apresentados neste trabalho seguem a metodologia proposta por Santos [2002], já mencionado neste texto. O procedimento adotado sugere a escolha de ações capazes de melhorar o VPL do projeto quando aplicado ao modelo de simulação.

A otimização do modelo base está descrito na Tabela 4.7. Maiores detalhes sobre o processo de otimização deste modelo encontra-se no Anexo 2, no final deste trabalho.

Tabela 4.7. Otimização do Modelo Base.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	86,14	45,55
Modelo Otimizado	169,73	39,07
Incremento [%]	49,25	

4.2.4 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é realizada através da substituição dos níveis otimistas e pessimistas dos atributos no caso base, seguida de simulação numérica de fluxo e avaliação da função-objetivo. A quantidade de simulações encontra-se relacionada com o número de níveis relativos a cada atributo incerto, conforme Tabela 4.5.

A Figura 4.16, a Figura 4.17 e a Figura 4.18 mostram a sensibilidade de cada nível com relação às funções objetivo VPL, N_p e W_p , respectivamente. Pode-se observar que os atributos críticos encontrados na análise realizada para a função VPL foram o contato água-óleo (dwoc), a permeabilidade horizontal (permx), o modelo estrutural (areas) e a permeabilidade vertical (permz).

A consideração do VPL como único parâmetro de análise pode não ser adequada em alguns casos, não devendo ser analisada separadamente, de forma que outras

funções objetivo devem ser analisadas, como a produção acumulada de água (W_p) e de óleo (N_p). Então, devem ser observadas outras funções objetivo, como o N_p e W_p .

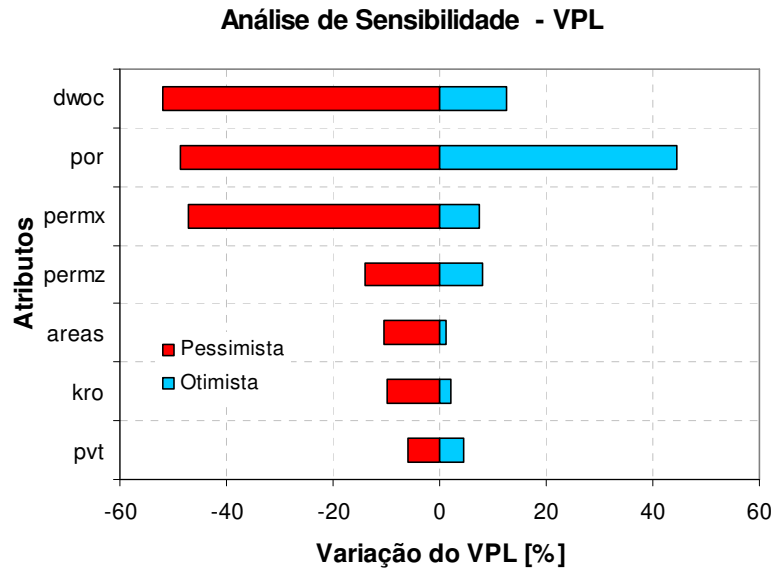


Figura 4.16. Análise de sensibilidade para a função objetivo VPL (20 anos).

Em que:

dwoc – contato água-óleo

permx – permeabilidade horizontal

por – porosidade

areas – modelo estrutural

permz – permeabilidade vertical

cpor – compressibilidade da rocha

kro – curvas de permeabilidade relativa óleo-água

pvt – tabela de pressão-volume-temperatura para o óleo e gás

Utilizando as funções N_p e W_p , pode-se visualizar a importância da variável kro, demonstrada na Figura 4.17 e na Figura 4.18.

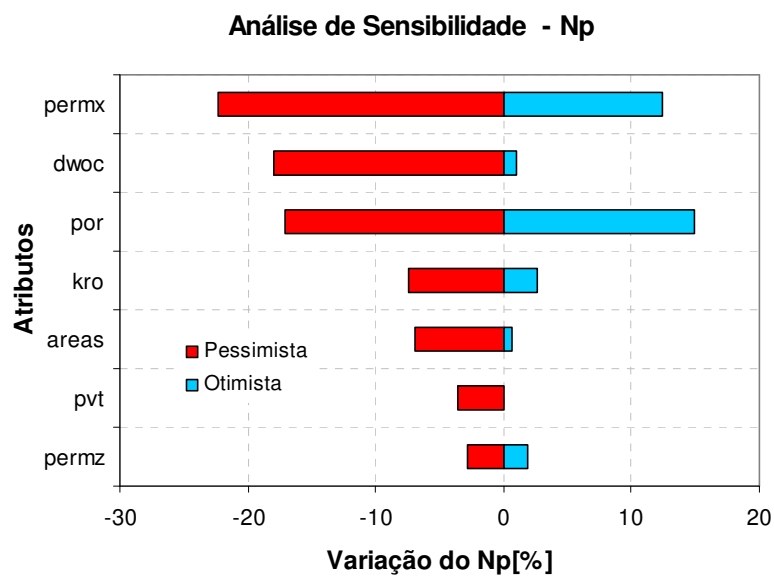


Figura 4.17. Análise de sensibilidade para a função objetivo N_p (20 anos).

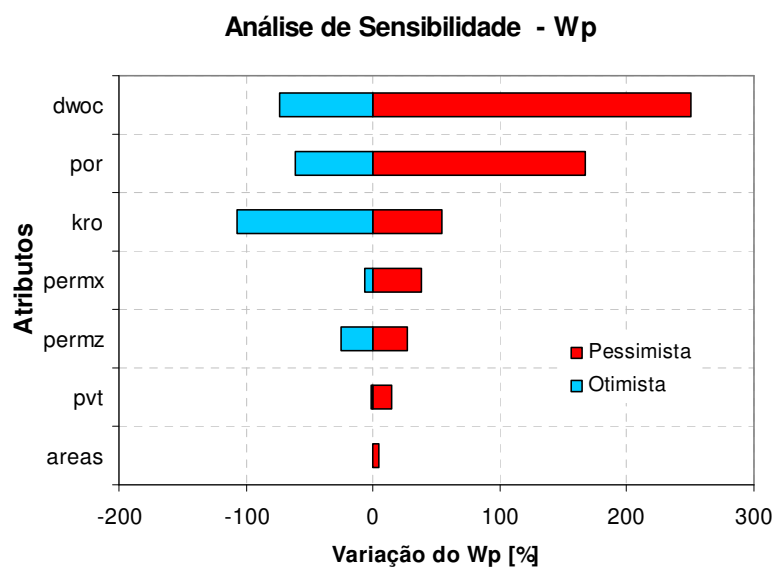


Figura 4.18. Análise de sensibilidade para a função objetivo W_p (20 anos).

4.2.5 Composição da curva de risco inicial para a estratégia inicial

A Figura 4.19 mostra a curva de risco do projeto antes e depois da otimização do caso base, juntamente com os seus percentis P10, P50 e P90. Pode-se observar que, após o processo de otimização aplicado ao caso base, a curva de risco se deslocou para a direita do eixo x, reduzindo também o risco do projeto, ou seja, a diferença entre os percentis P10 e P90 (antes da otimização, $P10 - P90 = 191,68$ milhões de dólares, para $P10 - P90 = 175,72$ milhões de dólares após a otimização). Foram consideradas como atributos críticos somente as variáveis dwoc (3 níveis), areas (2 níveis), por (3 níveis) e permx (3 níveis), gerando um total de simulações $N = 3^3 \cdot 2^1 = 54$ modelos.

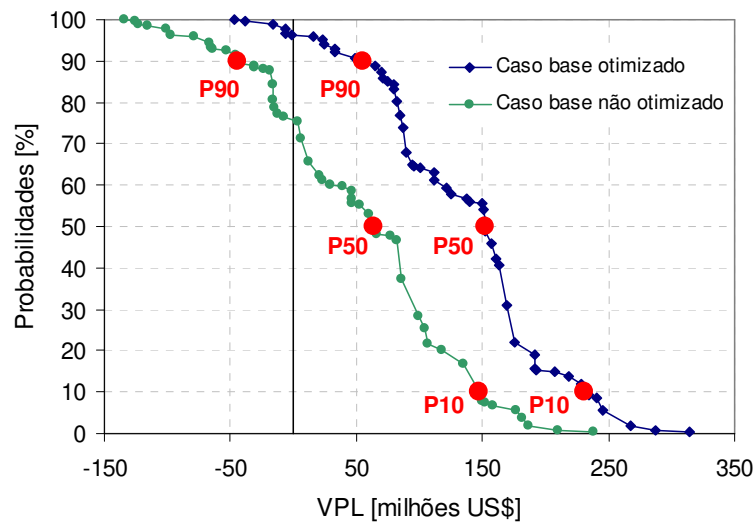


Figura 4.19. Curva de risco do projeto.

4.2.6 Composição da árvore de derivação

Considerando os atributos críticos determinados pela análise de sensibilidade, obtém-se a árvore de derivação mostrada na Figura 4.20 (atributos: areas com 2 níveis, dwoc com 3 níveis, por com 3 níveis e permx com 3 níveis), que resulta em uma árvore com $3^3 \cdot 2^1 = 54$ ramificações, modelos ou cenários possíveis.

4.2.7 Transformação da árvore de derivação em árvore de decisão

A transformação da árvore de derivação em árvore de decisão depende de quantos e quais atributos são passíveis de redução de incerteza através da obtenção da informação. Neste trabalho são mostrados 3 tipos de resultados. No primeiro caso, os atributos considerados passíveis de redução de incerteza através da perfuração de um poço, são os atributos areas (2 níveis) e dwoc (3 níveis). Considerando neste exemplo que a informação a ser obtida é perfeita, a informação eliminará totalmente a incerteza com relação aos atributos contato óleo-água e modelo estrutural. Desse modo, a obtenção desta informação permite que a árvore de derivação se transforme na árvore de decisão explicitada na Figura 4.21. Num segundo caso, mais 2 atributos além do contato óleo-água e do modelo estrutural são considerados passíveis de redução de incerteza através da obtenção da informação. No terceiro, 3 atributos são considerados passíveis de redução de incerteza completamente (dwoc, areas e por) e 1 atributo parcialmente (permx).

4.2.8 Escolha dos modelos geológicos representativos (MGR)

O processo de escolha dos MGR é objeto de estudo deste trabalho e, por isso, neste exemplo é apresentada uma escolha gradativa dos MGR, inicialmente com 6 modelos, mas variando esse número de 3 a 12 modelos. A aplicação dos MGR é diferenciado dependendo do método utilizado no cálculo dos VME com e sem informação. Considerando o método da árvore completa, a estratégia de produção de cada MGR é o fator mais importante na análise, de maneira que o conhecimento do maior número de estratégias otimizadas, oriundas da árvore de decisão, influencia fortemente o valor da informação. Já para o método dos MGR, os modelos geológicos representativos são literalmente utilizados para representar a árvore de decisão, substituindo e simplificando a árvore de decisão original. O processo de escolha dos MGR são idênticos para ambos os métodos utilizados, porém, com aplicações diferenciadas. Os dois métodos são explicitados individualmente nos próximos itens para os três resultados citados acima.

4.2.9 Cálculo dos VME com e sem informação – Método 1 – Árvore Completa

4.2.9.1 VDI completa para 2 atributos

Inicialmente, a árvore de decisão da Figura 4.21 foi subdividida em 6 grupos diferentes, de maneira que se possa englobar a incerteza agregada às variáveis contato óleo-água (dwoc – 3 níveis de incerteza) e modelo estrutural (areas – 2 níveis de incerteza). Após esta divisão, foi escolhido um modelo de cada grupo correspondente à respectiva ramificação dos atributos passíveis de redução de incerteza (total de 6 MGR). Posteriormente, realizou-se uma redução e um aumento gradativo, eliminando e adicionando-se, respectivamente, modelos representativos e, conseqüentemente, estratégias de produção, para estudar a influência do número de MGR/estratégias na confiabilidade do cálculo do VDI a ser obtida. Inicialmente, pode-se imaginar que os modelos que devem ser acrescentados devem ter probabilidades mais altas, para que possam influenciar a resposta e características físicas diferentes, pois resultariam em diferentes estratégias a serem testadas. Entretanto, quanto mais afastados do caso base são os modelos (no gráfico VPL *versus* FR), mais diferentes são as características dos modelos, mas menor as probabilidades de ocorrência. Dessa forma, é difícil afirmar *a priori* que os modelos selecionados trarão benefícios ao processo de quantificação de VDI.

Com o aumento do número de modelos representativos, mais de um modelo por grupo deve ser escolhido. Entretanto, um maior número de MGR deve estar concentrado na representatividade dos modelos com maior probabilidade de ocorrência porque a concentração de altas probabilidades em um determinado modelo pode gerar resultados errôneos ou distorcidos da realidade. A Figura 4.22 mostra que o diâmetro de cada círculo é proporcional à probabilidade do respectivo modelo. Quanto maior o diâmetro do círculo, maior a probabilidade do modelo. Pode-se notar que os Grupos 1, 2 e 3 possuem os modelos com as maiores probabilidades de ocorrência (círculos maiores) dentre os 54 modelos. Portanto, um número maior de MGR deve estar presente nestes grupos. Outro fator importante na escolha e avaliação dos modelos é a seleção de modelos com características distintas entre si, por exemplo a grande variação entre os possíveis valores do VPL e FR, ou seja, possíveis variações na estratégia de produção e diferenças geológicas entre os modelos.

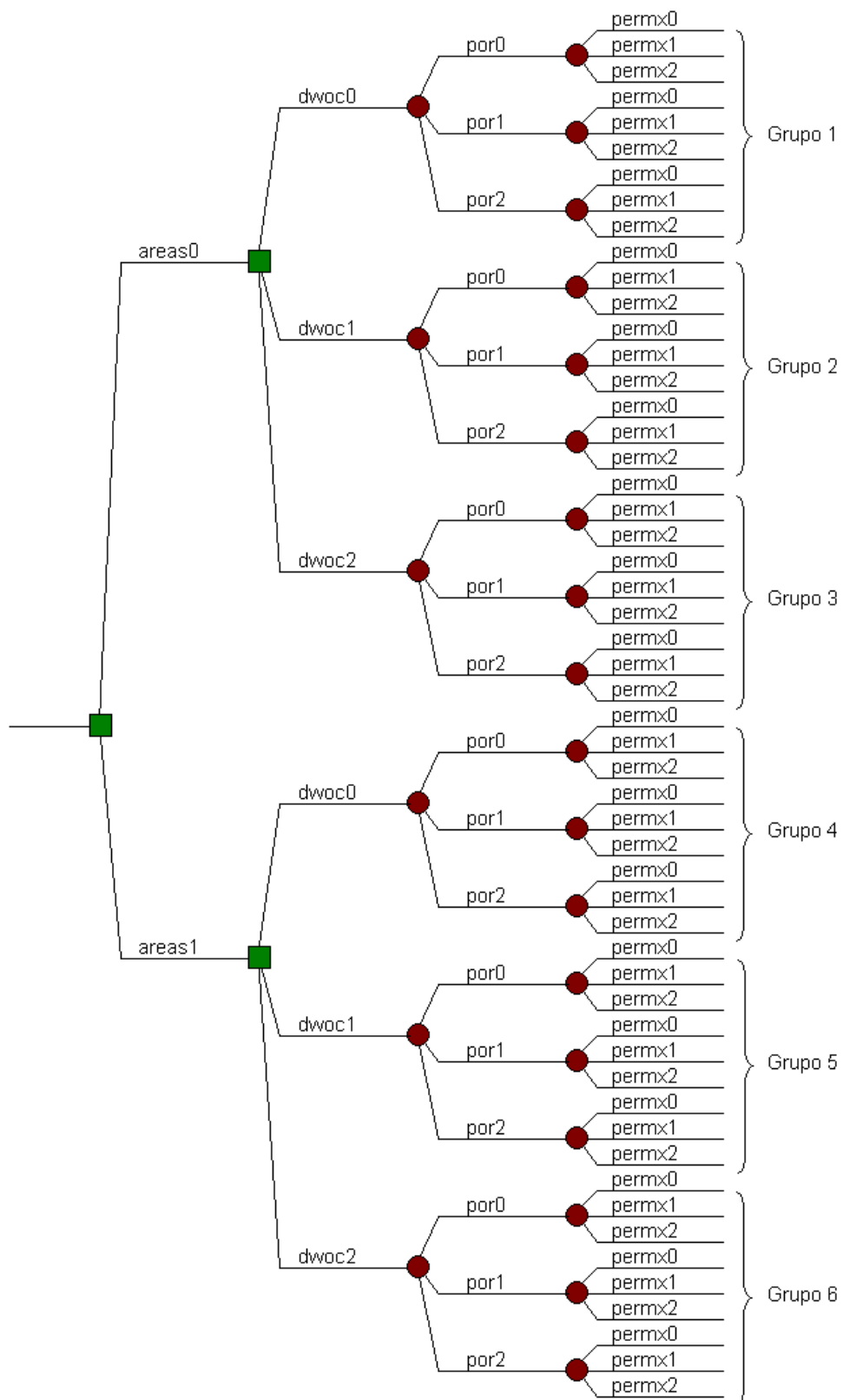


Figura 4.21. Árvore de decisão subdividida em 6 grupos.

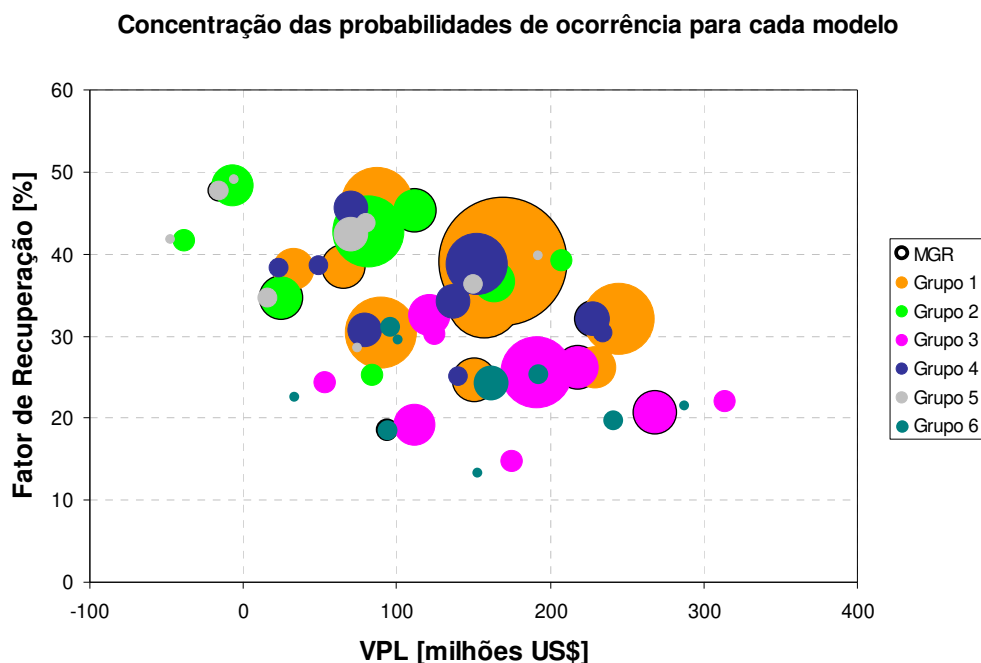


Figura 4.22. Concentração das probabilidades de ocorrência para cada modelo.

A escolha de cada modelo pode ser melhor visualizada gerando um gráfico dos valores de todos os VPL calculados *versus* os correspondentes fatores de recuperação (FR) simulados (Figura 4.23). Os grupos são identificados por diferentes símbolos e cores. Deve-se obter um modelo representativo para cada cor (grupos diferentes) gradativamente para representar diferentes regiões do gráfico, por exemplo, regiões de baixo FR com altos e baixos VPL, regiões de altos FR com altos e baixos VPL, etc., ou seja, regiões com FR e VPL semelhantes. Este gráfico mostra quais modelos foram selecionados e utilizados no cálculo do valor da informação (adicionados e retirados de forma gradativa), inicialmente com 6 MGR.

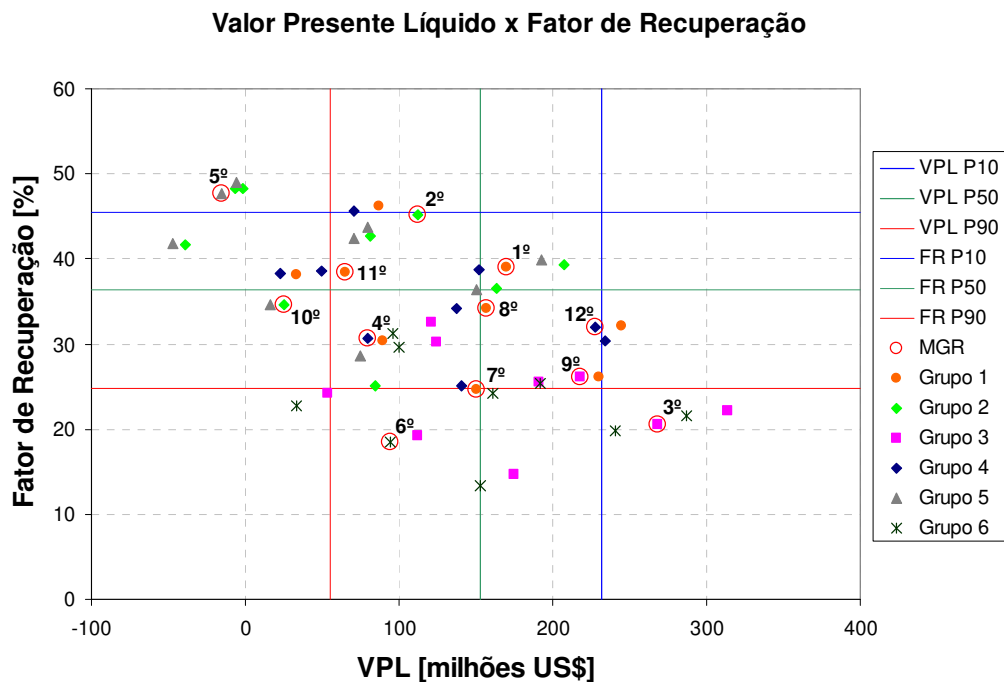


Figura 4.23. Ordem de escolha dos 12 modelos geológicos representativos (MGR).

Após a escolha dos modelos representativos, cada um destes modelos deve ser otimizado. O processo de otimização utilizado foi o proposto por Santos [2002]. A Figura 4.24 compara os VPL dos modelos representativos antes da otimização, em que a estratégia base é aplicada a todos os modelos, e depois da otimização de cada modelo representativo, individualmente. O valor da informação depende muito do processo de otimização, porque, quanto melhor a otimização de cada modelo, maior serão seus respectivos VPL, mais precisa será a definição de cada estratégia de produção e, conseqüentemente, mais confiável será o processo de cálculo do valor da informação.

Entretanto, quando existe mais de uma estratégia (MGR) por grupo, deve-se escolher somente uma estratégia para representar o grupo, ou seja, aquela que maximize o VME do grupo, já que existe somente 6 possibilidades de ocorrência para os atributos areas e dwoc combinados.

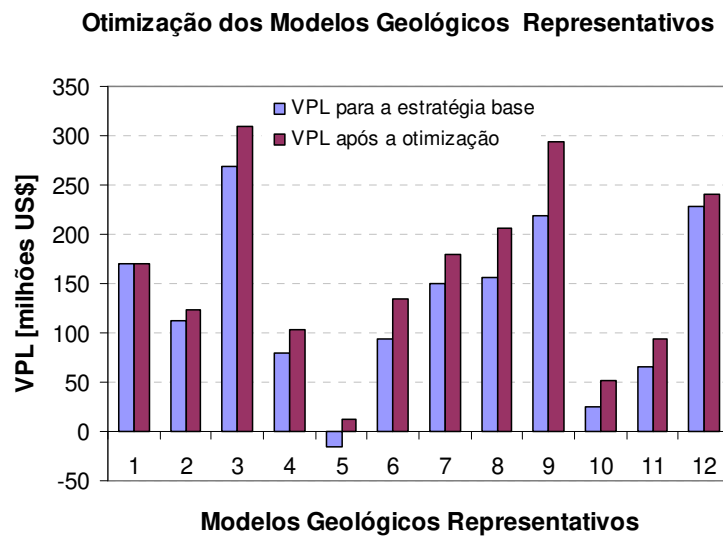


Figura 4.24. Comparação entre os VPL dos 12 MGR antes e depois da otimização.

Um dos modelos representativos escolhidos foi o modelo base (modelo 1), pois já havia sido otimizado. Contudo, o modelo 1 foi re-otimizado, porque, com a substituição de cada estratégia em todos os modelos representativos, constatou-se que a estratégia do modelo base, que anteriormente possuía um VPL de 136,08 milhões de dólares, não estava otimizado realmente, ou seja, ao substituir a estratégia 4 no modelo representativo 1 (base), foi calculado um VPL maior. Uma nova otimização foi realizada para o caso base, resultando em um VPL de US\$ 169,73 milhões. Este processo é iterativo (fluxograma da Figura 3.1), pois uma outra estratégia resultou em VPL maior que o anterior na verificação do processo de otimização realizado. Maiores detalhes sobre o processo de otimização de cada modelo representativo encontram-se no Anexo 2.

A diferença na estratégia de produção de cada modelo reflete a influência das variações dos atributos geológicos. A variação do contato óleo-água e do modelo estrutural irá influenciar fortemente a alocação e a escolha do número de poços produtores e injetores.

A Figura 4.25 expõe o número de poços empregados em cada estratégia de cada modelo representativo otimizado. Existe uma variação máxima de nove poços horizontais entre as 12 estratégias, ou seja, isto implica em diferentes sistemas de produção e capacidades de injeção e

produção de fluidos. A Figura 4.26 mostra que há uma variação de aproximadamente 45 milhões de m^3 na produção total de fluidos (N_p e W_p) entre os modelos representativos 3 e 10, uma variação de 20 milhões de m^3 na produção de água entre os modelos 6 e 11 e uma variação de 38 milhões de m^3 na produção de óleo entre os modelos 5 e 9. Estas diferenças implicam na diversificação da definição de plataformas, dimensionamento da capacidade de processamento do óleo, tratamento e injeção de água.

Uma observação deve ser feita com relação à baixa produção de água acumulada dos modelos representativos 4, 6, 7 e 9: as aberturas e alocações dos poços injetores no processo de otimização visaram a maximizar a função objetivo VPL. Outro fator responsável por esse baixo índice é o fato de que alguns modelos possuem baixo contato óleo-água e baixa permeabilidade horizontal, favorecendo ou não a produção de água e óleo ao longo da vida do campo.

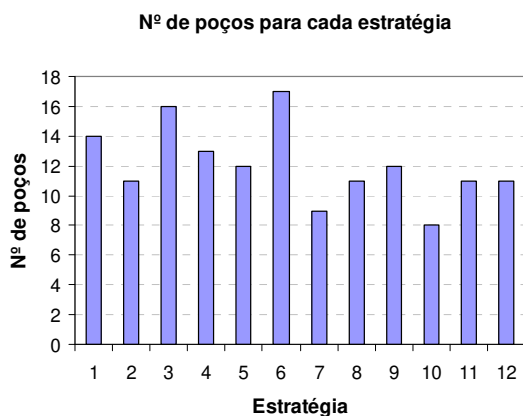


Figura 4.25. Diferença do número de poços para cada estratégia otimizada.

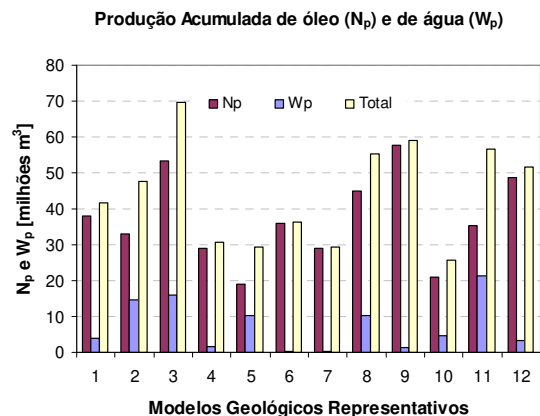


Figura 4.26. Variação da produção acumulada de óleo e água para cada MGR.

No cálculo dos VME, o VME sem informação corresponde à melhor estratégia utilizada a todos os ramos da árvore de derivação. Independente de quantos ramos ou grupos passíveis de redução de incerteza existam, o VME sem informação é o mesmo. Já o VME com informação depende de quantos ramos ou grupos passíveis de redução de incerteza existem no problema, ou seja, deve-se definir uma única e melhor estratégia para cada ramo ou grupo passível de redução

de incerteza. Esta alternativa torna-se inviável em casos que a simulação de toda árvore exige muito tempo (árvore extensa) ou em casos que o processo não é automatizado.

Considerando a redução da incerteza dos atributos *areas* e *dwoc*, que combinados geram 6 ramos ou grupos passíveis de redução de incerteza, o VME com informação é calculado pelo somatório dos VPL vezes suas respectivas probabilidades, de maneira que cada grupo possua uma estratégia que maximize seu VME parcial. Portanto, para o cálculo do VDI com 12 MGR, cada grupo dentre os 6, possui uma estratégia otimizada que maximiza o VME parcial do grupo. O somatório destes VME parciais resultam no VME com informação. Para a análise em questão, foram realizadas 648 simulações (54 modelos da árvore vezes 12 estratégias otimizadas) para a determinação dos VME com e sem informação.

A Figura 4.27 mostra a variação do VDI e dos VME com e sem informação para o caso do cálculo mais preciso. Pode-se observar que os valores dos VME são crescentes em geral conforme o aumento do número de estratégias no processo de cálculo. O VDI mostra-se muito sensível a estas variações (pois é a diferença entre os VME). A adição da quinta estratégia mostra-se mais eficiente para a árvore completa do que para os grupos específicos, de forma que o aumento do VME sem informação é maior do que o com informação. Já a adição da oitava estratégia mostra-se mais expressiva para determinados grupos da árvore fazendo com que o VME com informação seja maior que o VME sem informação. Nesse caso, o VDI estabiliza em um valor próximo a US\$ 8 milhões.

A Figura 4.28 mostra a distribuição dos grupos no gráfico VPL *versus* FR. Pode-se observar que os grupos não estão muito distantes entre si (principalmente os grupos que diferem pelo atributo *areas*), o que resulta em pouca variação na estratégia de produção considerando que a informação reduz a incerteza somente dos atributos *areas* e *dwoc*. Por isso, o VDI não é muito grande. Pelo mesmo gráfico, pode-se observar que o uso dos MGR para representar cada grupo no cálculo do VME pode não ser uma boa aproximação.

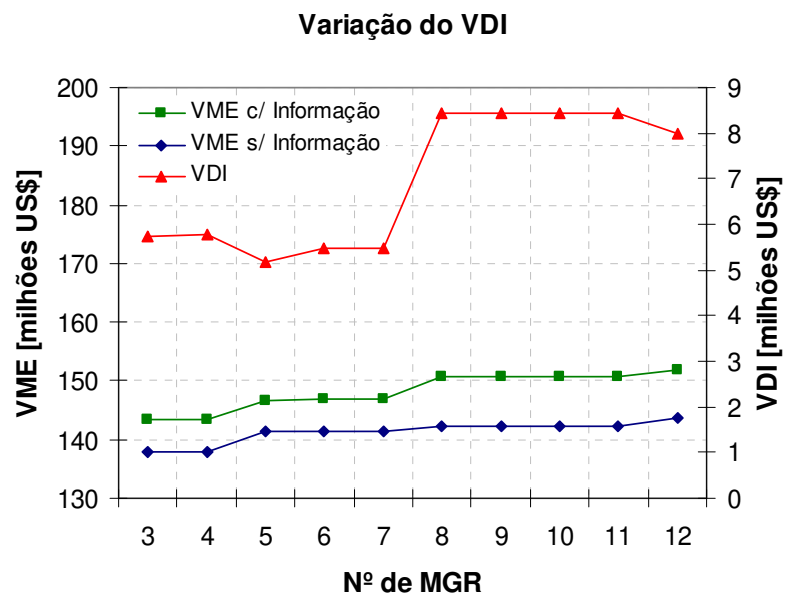


Figura 4.27. Cálculo do VDI através da simulação de cada estratégia otimizada dos MGR em todos os ramos da árvore de derivação e decisão.

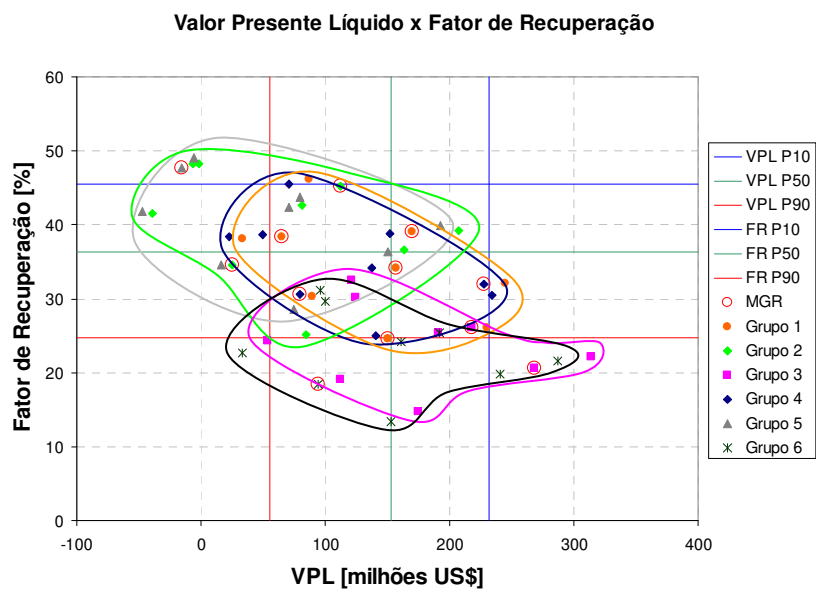


Figura 4.28. Variação dos grupos no gráfico VPL *versus* FR.

A Figura 4.29 mostra o cálculo do VME sem informação para cada estratégia otimizada dos MGR. As maiores diferenças são observadas na adição das Estratégias 5, 8 e 12. O aumento relativo entre o VME sem informação e com determina o crescimento e diminuição do VDI.

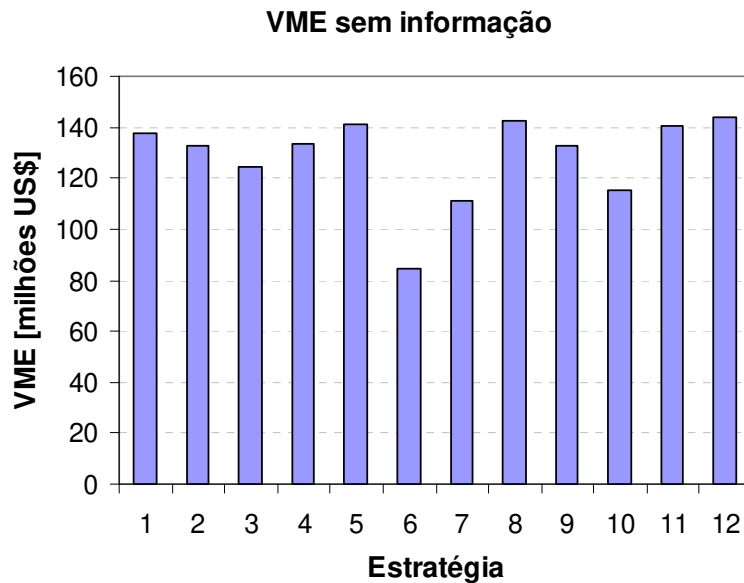


Figura 4.29. Cálculo do VME de cada estratégia otimizada dos MGR em todos os ramos da árvore de derivação.

Pode-se analisar a influência da obtenção da informação na curva de risco na Figura 4.30. A curva de risco em azul corresponde à curva com a melhor estratégia obtida para toda a árvore dentre as 12 possíveis (estratégia 12). A curva em verde corresponde à curva de risco, calculada após a obtenção da informação, definindo-se as melhores estratégias para cada grupo da árvore (6 grupos).

Observa-se que a curva em verde deslocou-se para a direita do eixo do VPL aumentando o VME do projeto e reduzindo o risco associado ao mesmo (P10 – P90) de US\$ 198,59 milhões para US\$ 186,05 milhões com a obtenção da informação (redução da incerteza de 2 atributos).

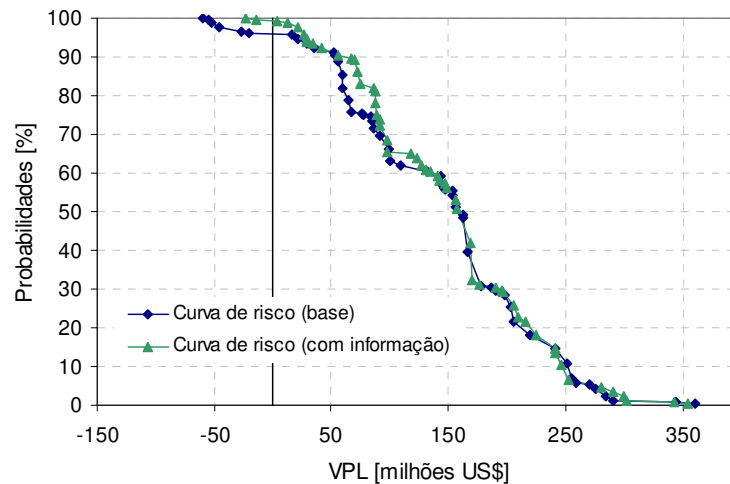


Figura 4.30. Curvas de risco com e sem informação para 2 atributos.

4.2.9.2 VDI completa para 4 atributos

A análise realizada neste item tem como objetivo mostrar a variação do valor da informação considerando 4 variáveis, isto é, a informação obtida reduz totalmente (completamente) a incerteza não só dos atributos modelo estrutural (areas) e contato óleo-água (dwoc) como também da porosidade (por) e permeabilidade horizontal (permx). Isto faz com que o conhecimento a respeito dos parâmetros porosidade e permeabilidade horizontal influencie a definição da estratégia de produção e aumente o valor da informação em relação à análise anterior.

Assumindo esta hipótese, a obtenção da informação permite que a árvore de derivação da Figura 4.20 se transforme na árvore de decisão da Figura 4.31, agora subdividida em 54 grupos (cada grupo é um modelo) e não mais 6 em que somente os atributos areas e dwoc eram analisados. Desta forma, todas as estratégias otimizadas dos modelos representativos podem ser aplicadas no cálculo do VDI. A Figura 4.32 mostra os 54 grupos da árvore de decisão da Figura 4.31. Analisando os 54 grupos individualmente, pode-se observar uma maior dispersão entre os grupos comparada a Figura 4.28.

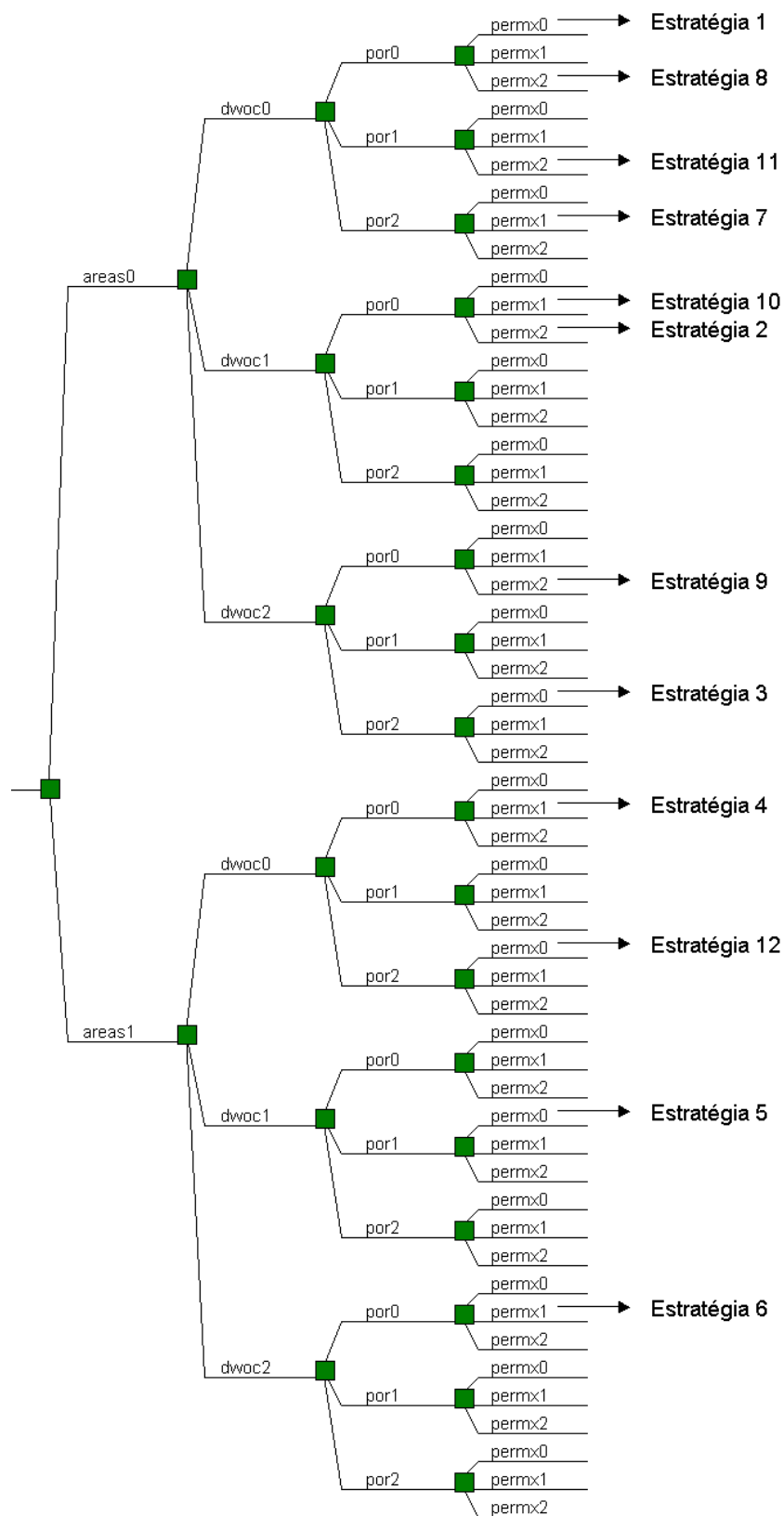


Figura 4.31. Árvore de decisão subdividida em 54 grupos.

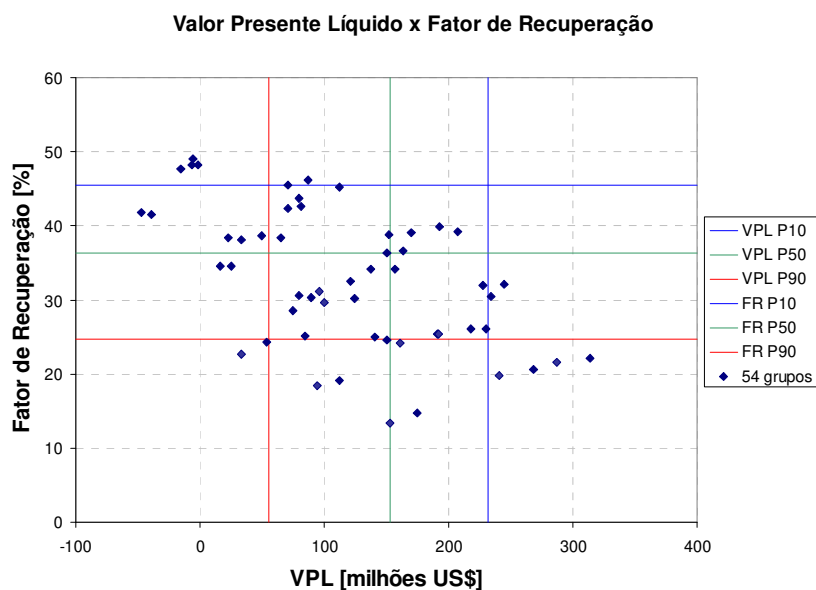


Figura 4.32. Análise dos 54 grupos da árvore de decisão.

A Figura 4.33 mostra o resultado do cálculo do VDI considerando que a informação reduz completamente a incerteza dos atributos dwoc, areas, por e permx. Pode-se notar que os valores da informação são maiores comparados ao da Figura 4.27, estabilizando aos US\$ 16 milhões.

O cálculo dos VME realizados através da substituição das melhores estratégias na árvore completa (Figura 4.33), ao invés da representatividade dos MGR¹², mostra-se mais confiável porque considera a influência das estratégias em relação aos demais ramos ou modelos da árvore, ao passo que nem todos os modelos têm suas estratégias otimizadas.

A influência da obtenção da informação na curva de risco é mostrada na Figura 4.34, idêntica à Figura 4.30. Observa-se que a curva em verde deslocou-se para a direita do eixo do VPL aumentando o VME do projeto e reduzindo o risco associado ao mesmo (P10–P90) de US\$ 198,59 milhões para US\$ 183,12 milhões com a obtenção da informação (redução da incerteza de 4 atributos).

¹² Será mostrado e comparado nos próximos itens considerando o Método dos MGR.

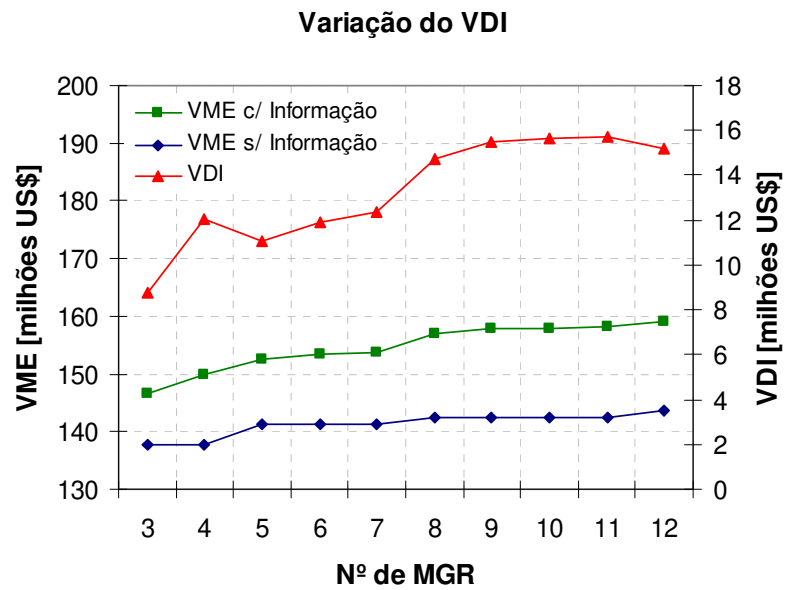


Figura 4.33. Variação do VDI e dos VME com e sem informação.

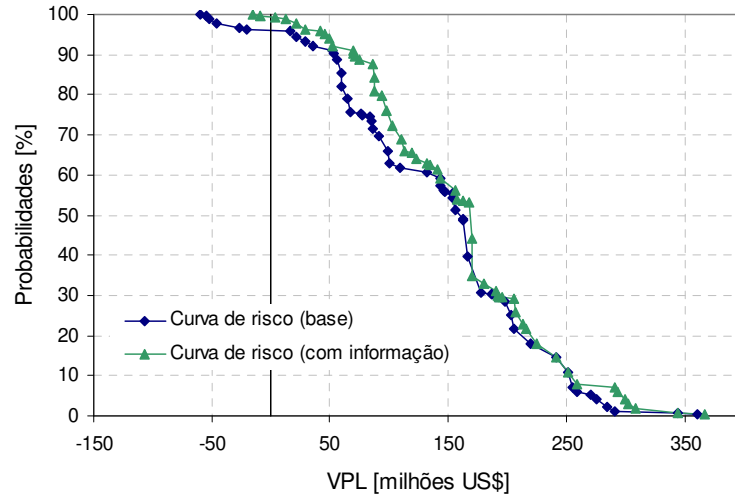
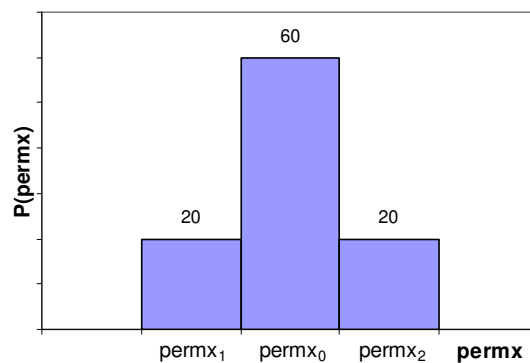


Figura 4.34. Curvas de risco com e sem informação para 2 atributos.

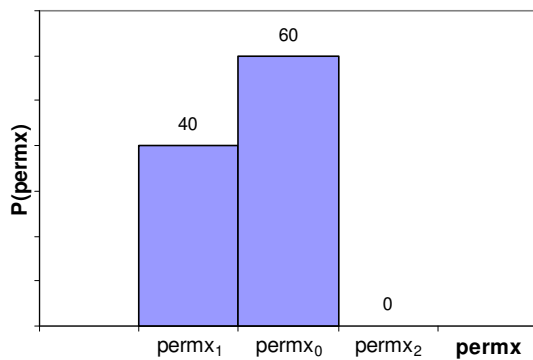
4.2.9.3 VDI completa para 3 atributos e incompleta para 1 atributo

O cálculo do valor da informação incompleta foi efetuado considerando que a perfuração de um poço elimina totalmente a incerteza com relação aos parâmetros modelo estrutural (areas),

contato óleo-água ($dwoc$) e porosidade (por), mas não com relação à permeabilidade horizontal do reservatório ($perm_x$). A obtenção da informação mostra que os valores de permeabilidade são mais otimistas ou mais pessimistas, de forma que a função densidade de probabilidade representada na Figura 4.35 (Item (a)) pode ser subdividida em duas funções: postura mais pessimista (Item (b)) e postura mais otimista (Item (c)).

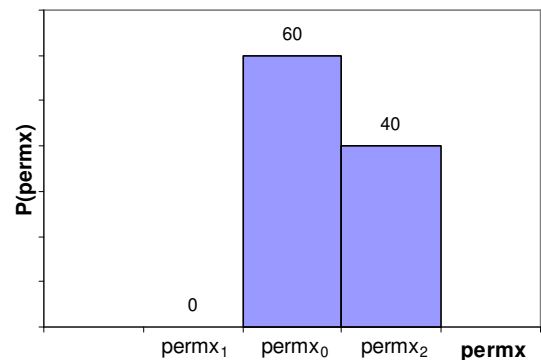


(a) Função densidade de probabilidade do atributo permeabilidade horizontal.



(b) Informação incompleta

($p_1 = 20\%$, $p_0 = 30\%$ e $p_2 = 0\%$).



(c) Informação incompleta

($p_1 = 0\%$, $p_0 = 30\%$ e $p_2 = 20\%$).

Figura 4.35. Função densidades de probabilidade da permeabilidade horizontal discretizada para a informação incompleta.

Com a obtenção da informação incompleta, a árvore de derivação mostrada na Figura 4.20 torna-se a árvore de decisão da Figura 4.36. O nó de decisão correspondente à permeabilidade horizontal é subdividido em dois ramos com nós de derivação em suas extremidades (otimista e

pessimista) para posteriormente ser subdividido em três níveis (otimista, provável e pessimista). Para o cálculo do VME sem informação através da árvore completa, deve-se determinar a estratégia que maximiza o VME da árvore completa como foi feito anteriormente. Já para o cálculo do VME com informação, a árvore de decisão é então subdividida em 36 grupos $\left(\frac{54}{3} \cdot 2\right)$ em que cada grupo deve possuir uma estratégia dentre todas as que foram otimizadas, que maximize seu VME parcial.

É importante observar que as equações escritas no Capítulo 3 (Equações 3.1 e 3.2) são válidas também para a informação incompleta. O que muda é apenas o número de grupos.

Os resultados do cálculo do valor da informação incompleta são mostrados na Figura 4.37 variando-se o número de modelos representativos de 3 a 12. Pode-se observar que os valores do VME sem informação são idênticos aos valores da Figura 4.27 e Figura 4.33.

A diferença entre os VDI para a obtenção da informação completa para 2 atributos (areas e dwoc), para 4 atributos (areas, dwoc, por e permx) e para a informação completa para 3 atributos (areas, dwoc e por) e incompleta para 1 atributo (permx) são mostrados na Figura 4.38. Pode-se notar que a informação incompleta é menor do que a informação completa, como afirmado desde o início, e maior do que a informação considerando a redução da incerteza de apenas 2 parâmetros.

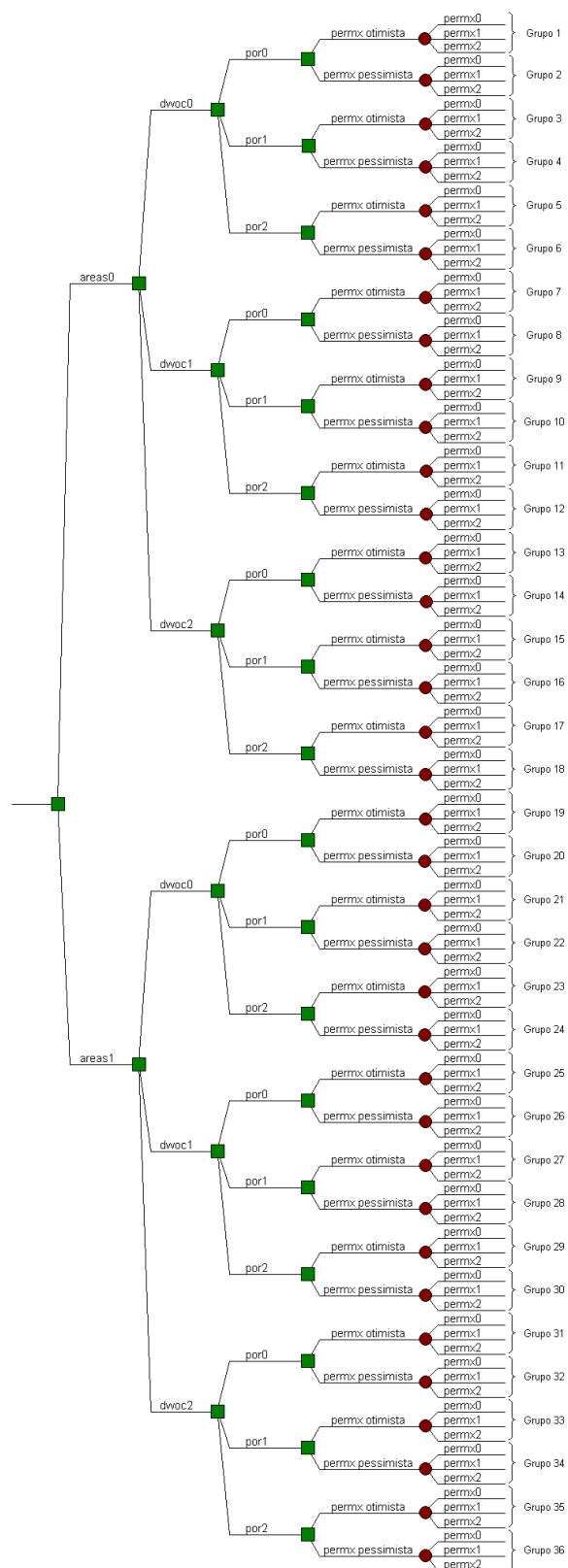


Figura 4.36. Árvore de decisão subdividida em 36 grupos.

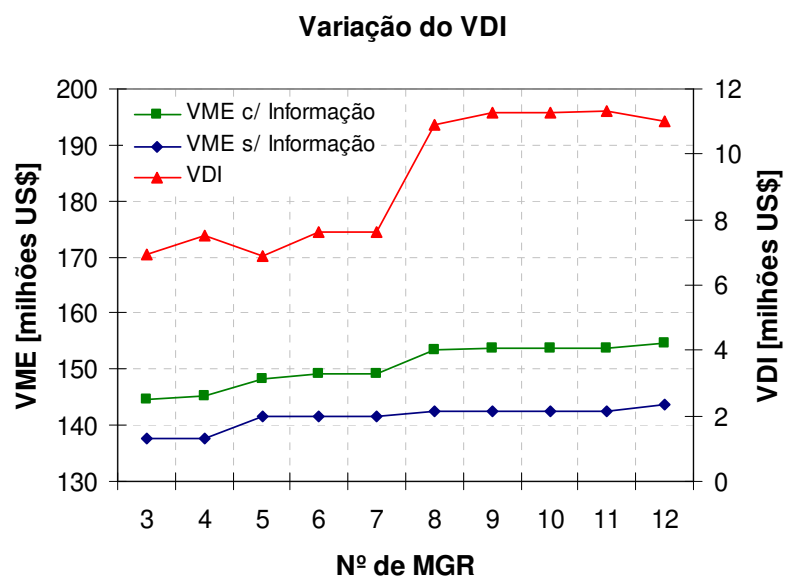


Figura 4.37. Variação do VDI e dos VME com e sem informação.

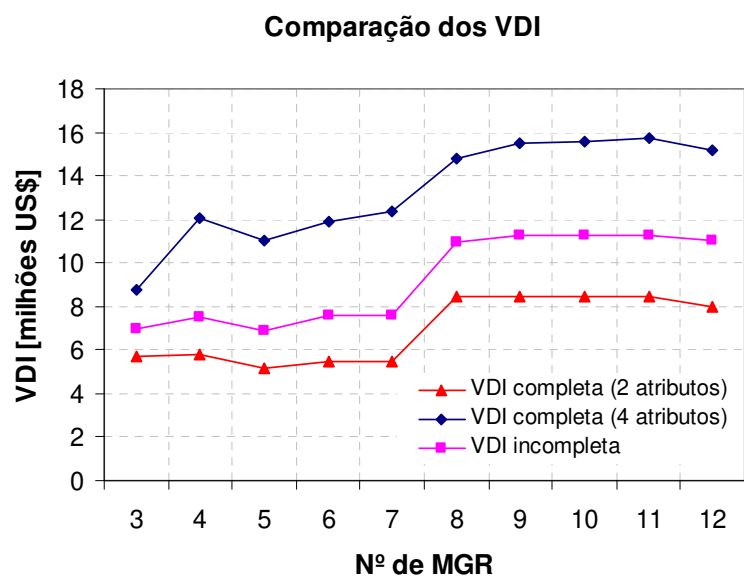


Figura 4.38. Comparação entre os VDI completa e incompleta.

4.2.10 Cálculo dos VME com e sem informação – Método 2 – MGR

Este método de cálculo dos VME com e sem informação utiliza os modelos representativos para literalmente substituir e representar a árvore de derivação e decisão. O cálculo dos VME com e sem informação é feito através da obtenção dos VPL dos modelos e das probabilidades calculadas pelos métodos propostos anteriormente.

A escolha de cada modelo é idêntica ao método anterior, melhor visualizada através do gráfico dos valores de todos os VPL calculados *versus* os correspondentes fatores de recuperação (FR) simulados (Figura 4.39 até a Figura 4.48). Os grupos são identificados por diferentes símbolos e cores. Esses gráficos mostram quais modelos foram selecionados e utilizados no cálculo do valor da informação (adicionados e retirados de forma gradativa), inicialmente com 6 MGR. Os 54 modelos foram divididos em 6 regiões, que foram agrupadas até a formação de somente 3 regiões e, posteriormente, as mesmas 6 regiões foram subdivididas em outras regiões, até a composição de 12 regiões representativas.

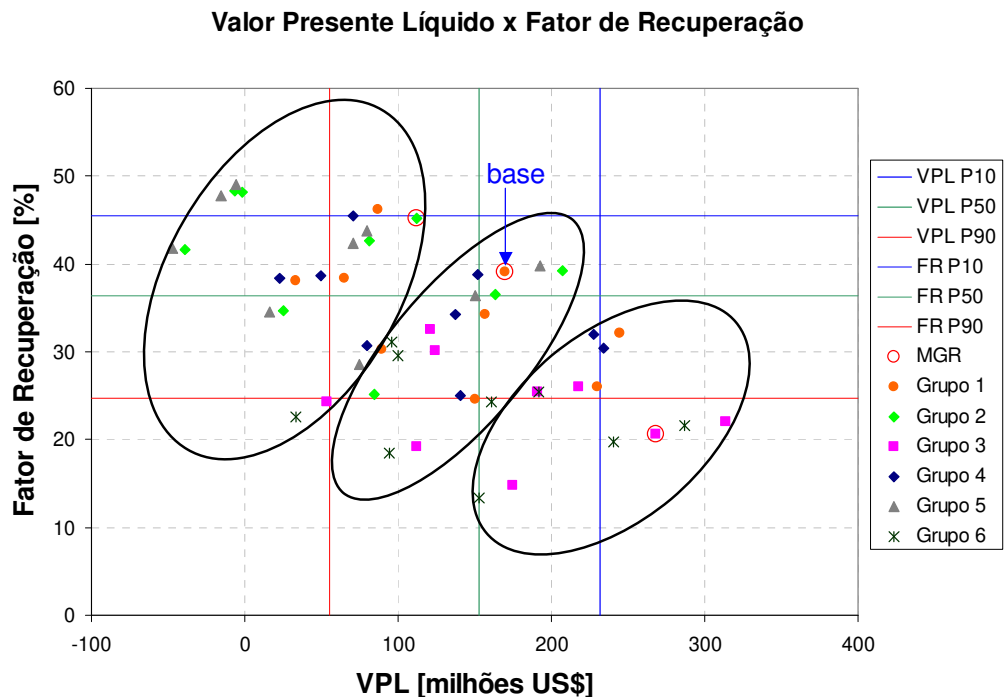


Figura 4.39. Escolha dos 3 modelos geológicos representativos (MGR).

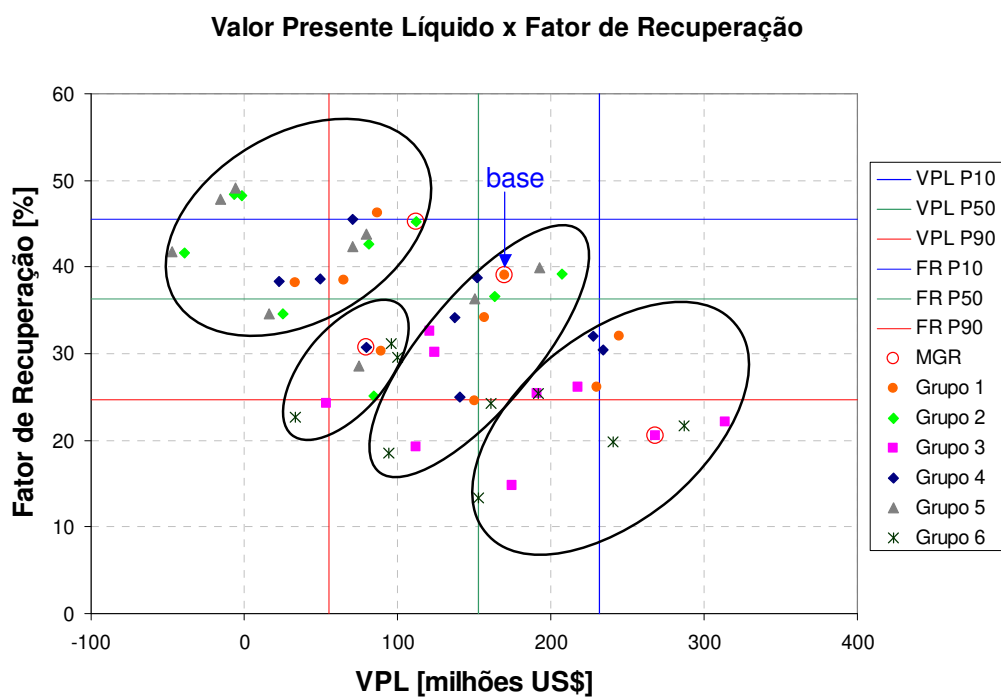


Figura 4.40. Escolha dos 4 modelos geológicos representativos (MGR).

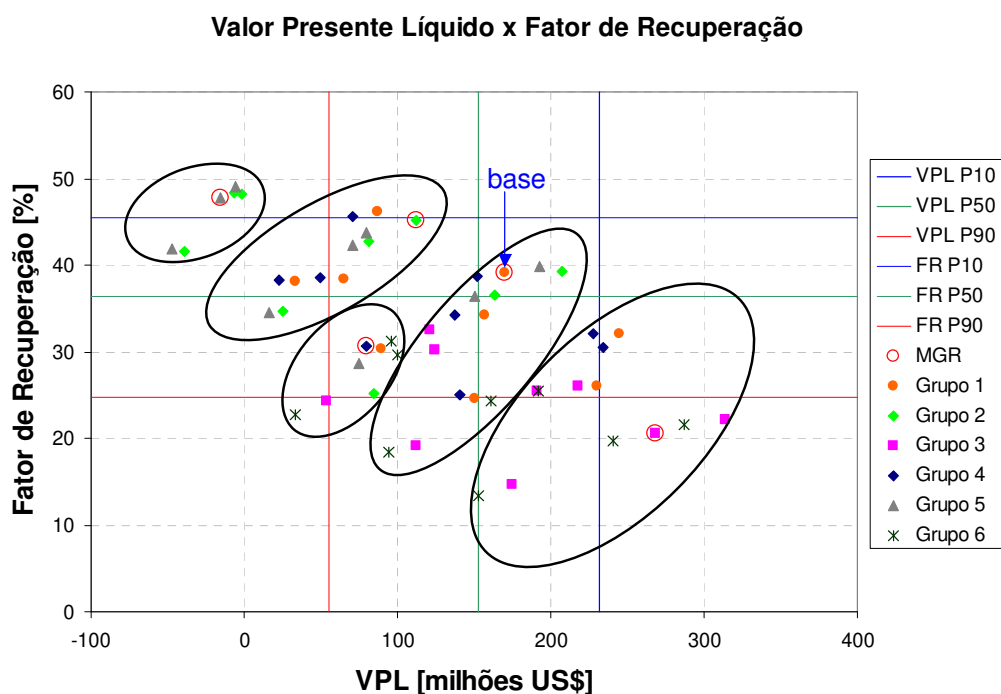


Figura 4.41. Escolha dos 5 modelos geológicos representativos (MGR).

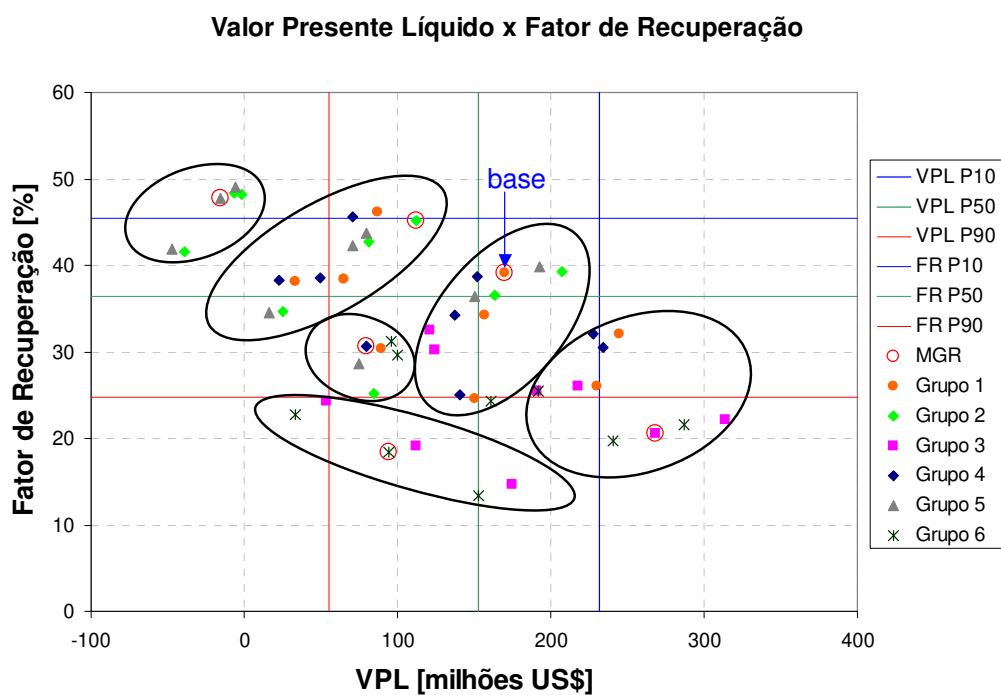


Figura 4.42. Escolha dos 6 modelos geológicos representativos (MGR).

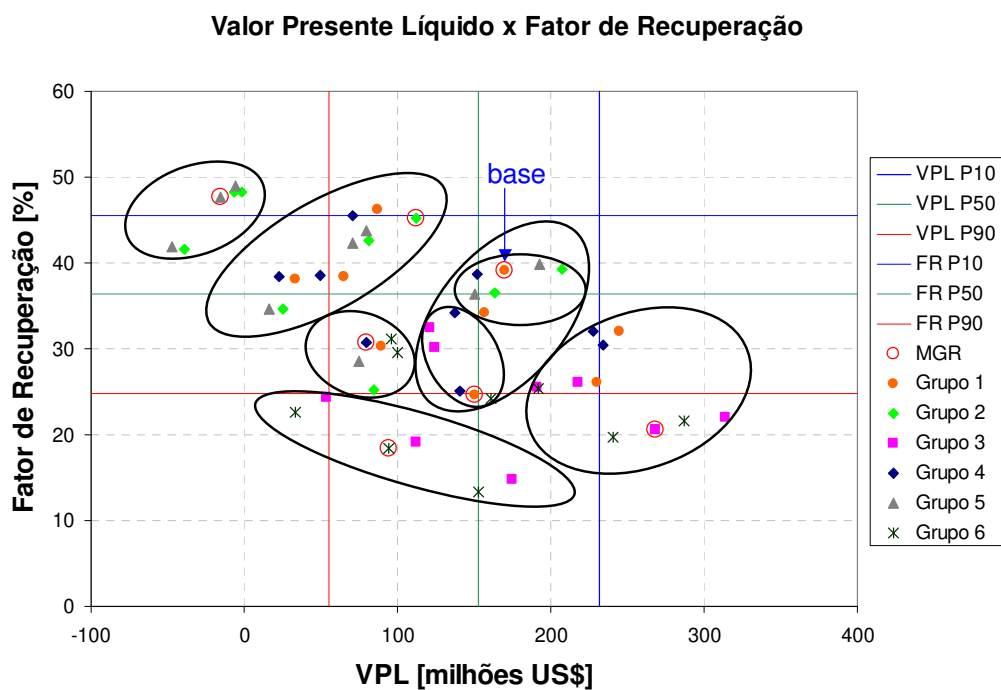


Figura 4.43. Escolha dos 7 modelos geológicos representativos (MGR).

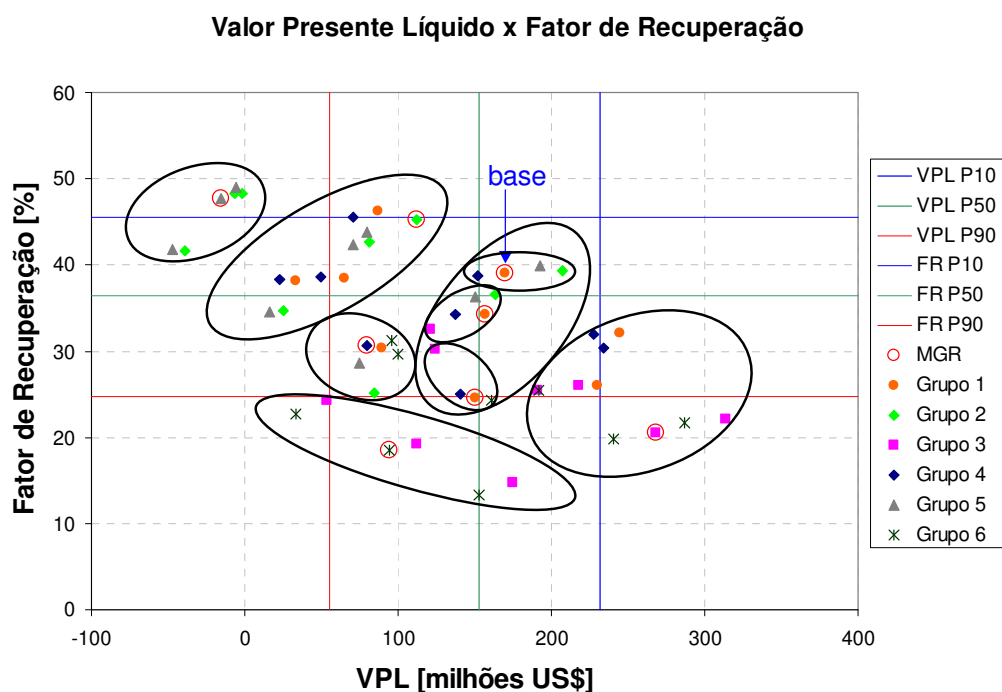


Figura 4.44. Escolha dos 8 modelos geológicos representativos (MGR).

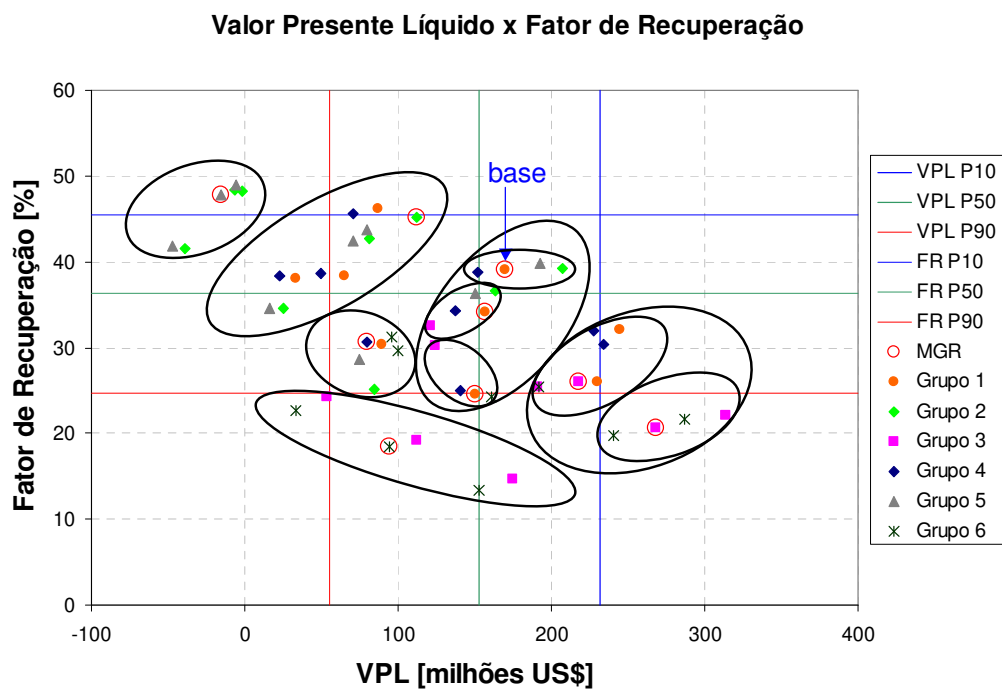


Figura 4.45. Escolha dos 9 modelos geológicos representativos (MGR).

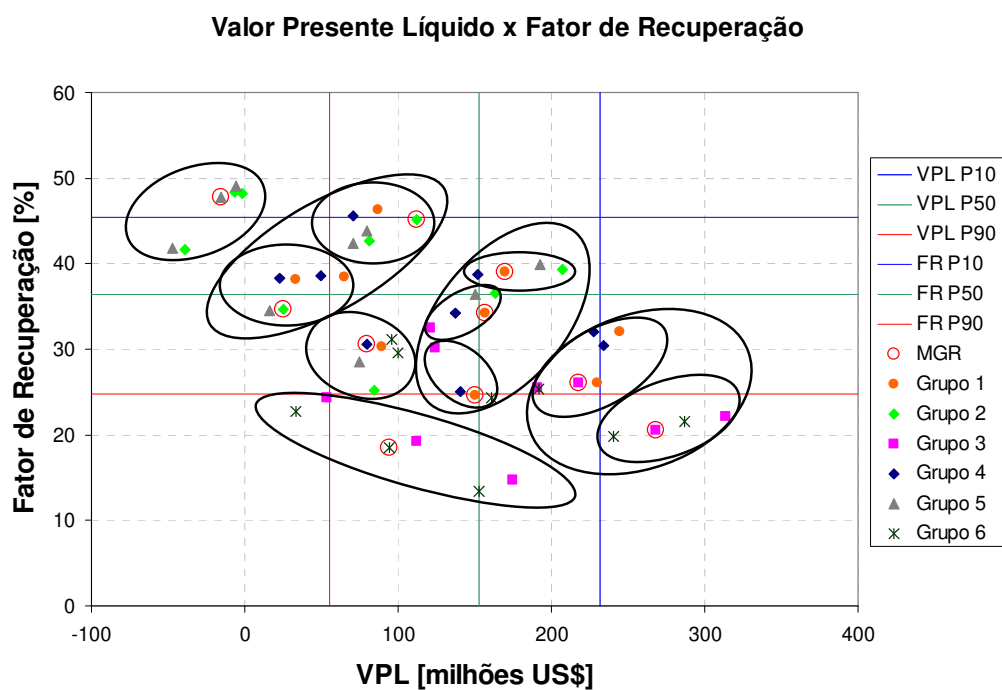


Figura 4.46. Escolha dos 10 modelos geológicos representativos (MGR).

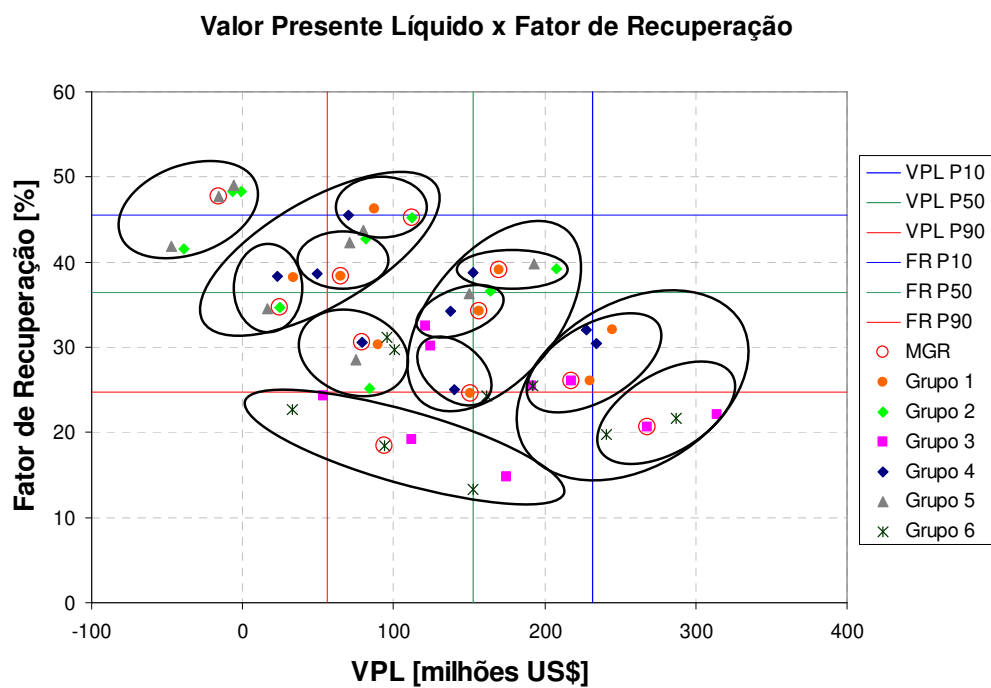


Figura 4.47. Escolha dos 11 modelos geológicos representativos (MGR).

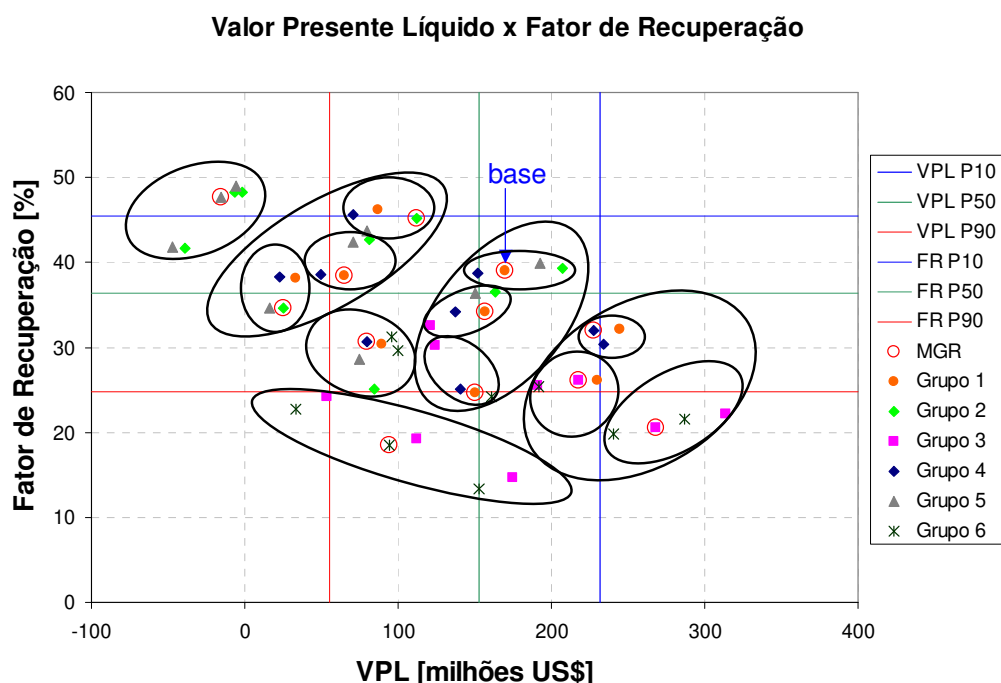


Figura 4.48. Escolha dos 12 modelos geológicos representativos (MGR).

As probabilidades de ocorrência de cada modelo representativo são mostradas e comparadas entre si, considerando cada método de cálculo de probabilidades proposto (Figura 4.49 a Figura 4.58). Pode-se notar que as probabilidades de ocorrência se aproximam com o aumento do número de modelos representativos, comparando-se os três métodos de cálculo propostos. Um maior peso foi empregado para o modelo 1 considerando o método dos ramos, porque sua probabilidade resulta da multiplicação das probabilidades dos atributos mais prováveis. Já para o método das distâncias, o peso maior foi empregado para os modelos 1, 4 e 8, porque estão mais centralizados na nuvem de pontos do gráfico VPL *versus* FR e, conseqüentemente, mais próximos da maioria dos pontos.

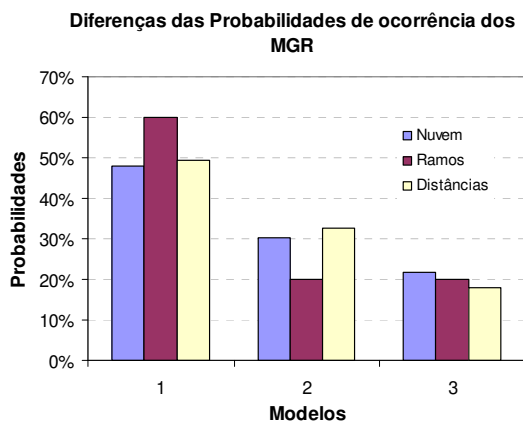


Figura 4.49. Probabilidades dos 3 MGR.

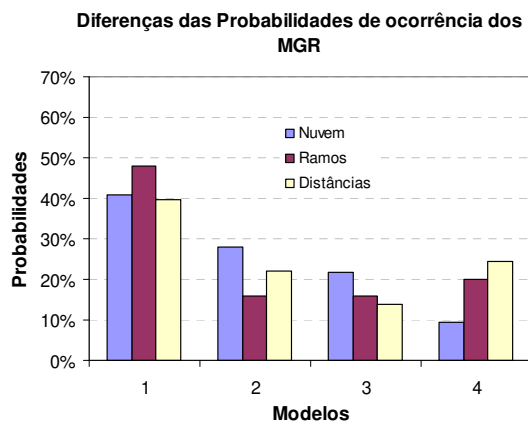


Figura 4.50. Probabilidades dos 4 MGR.

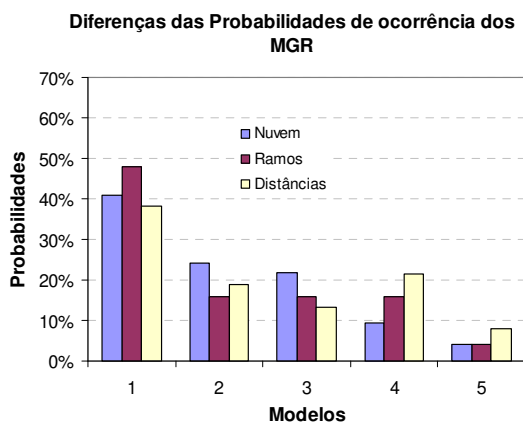


Figura 4.51. Probabilidades dos 5 MGR.

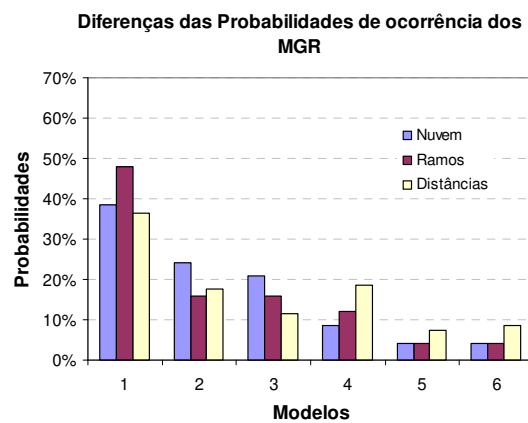


Figura 4.52. Probabilidades dos 6 MGR.

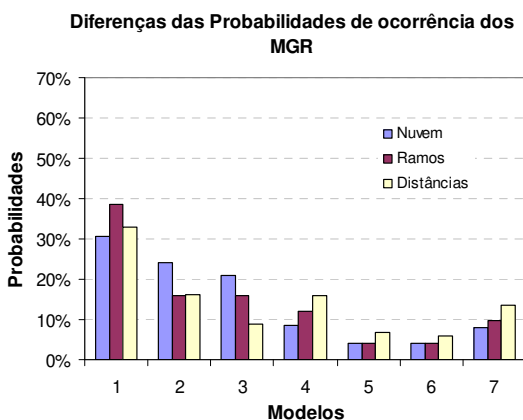


Figura 4.53. Probabilidades dos 7 MGR.

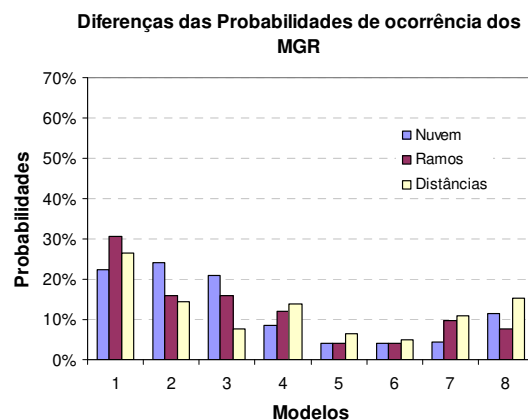


Figura 4.54. Probabilidades dos 8 MGR.

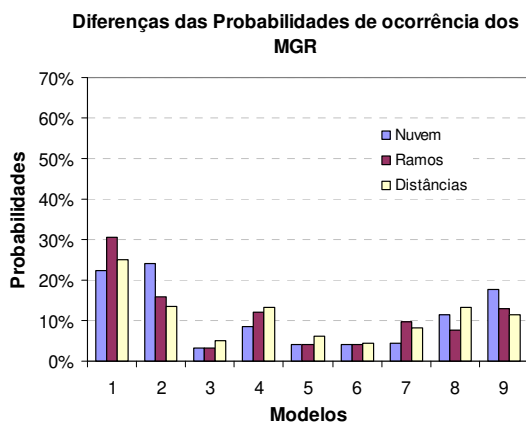


Figura 4.55. Probabilidades dos 9 MGR.

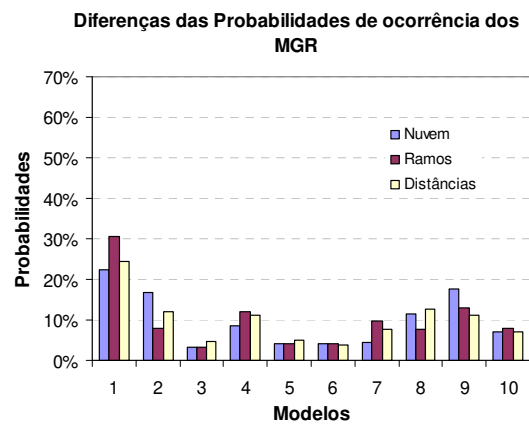


Figura 4.56. Probabilidades dos 10 MGR.

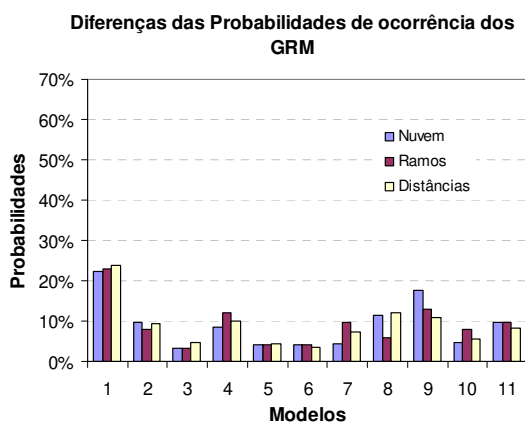


Figura 4.57. Probabilidades dos 11 MGR.

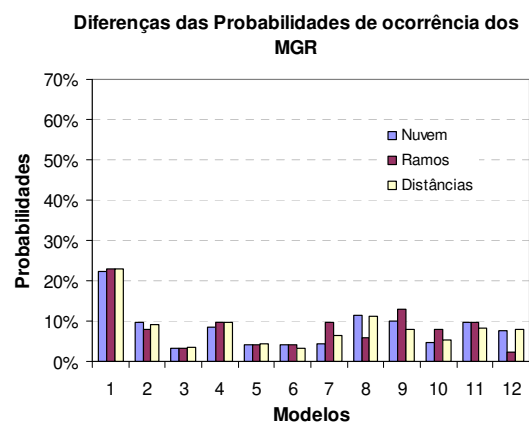


Figura 4.58. Probabilidades dos 12 MGR.

4.2.10.1 VDI completa para 2 atributos

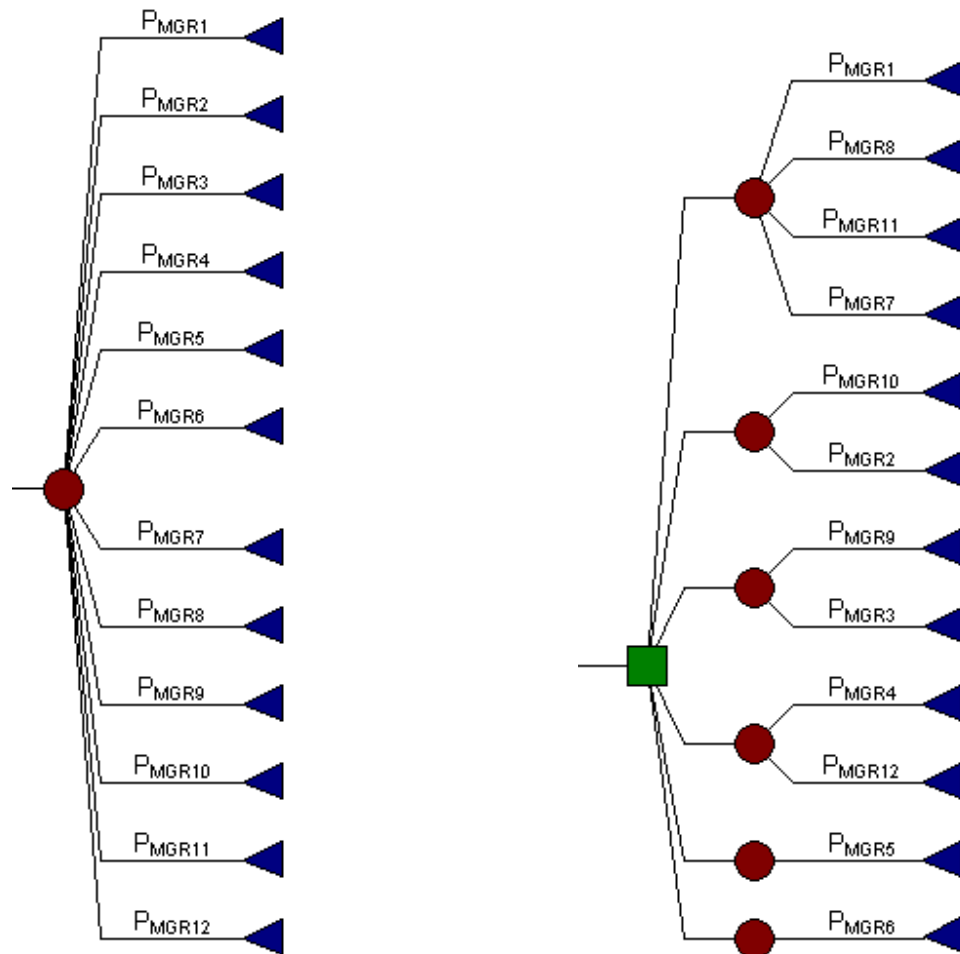
Após o processo de otimização dos MGR, todos os modelos representativos devem ser simulados com cada uma das estratégias otimizadas para determinar se nenhuma estratégia é melhor do que a suposta melhor estratégia de cada modelo e determinar a estratégia que proporciona à nova árvore de derivação o maior VME, selecionado para representar o caso estudado sem a obtenção da informação. O VME com informação é calculado através do somatório dos VPL dos modelos otimizadas, ou seja, os VPL de cada estratégia otimizada

correspondente a cada modelo representativo (Figura 4.24), multiplicado por suas respectivas probabilidades de ocorrência (Figura 4.49 a Figura 4.58).

Um estudo foi realizado para determinar a influência do número de MGR na confiabilidade do cálculo do VDI para o caso do método simplificado, ou seja, o uso dos MGR para representar a árvore e calcular os VME com e sem informação. Este número variou de 3 a 12 modelos, partindo de 6 MGR (número de grupos definidos pelo tipo de informação disponível), havendo uma redução para 3 modelos e um aumento para 12 modelos. A Figura 4.59 mostra um exemplo da substituição das árvores de derivação (Figura 4.20) e decisão (Figura 4.21) respectivamente pelas árvores de derivação (Item (a)) e decisão (Item (b)) simplificadas e representadas neste caso por 12 MGR utilizadas no cálculo do VDI.

Outro parâmetro analisado foi o método de cálculo das probabilidades de ocorrência dos MGR. Os três métodos apresentados anteriormente foram testados. Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.60.

Pode-se observar que os erros obtidos nos cálculos dos VME não são muito grandes, ou seja, os MGR podem ser usados para o cálculo aproximado dos VME com e sem informação. Entretanto, o VDI, que é a diferença dos VME, mostrou-se bastante sensível tanto ao número quanto a probabilidade dos MGR, não apresentando estabilização até a adição do modelo 12.



(a) Árvore de derivação simplificada.

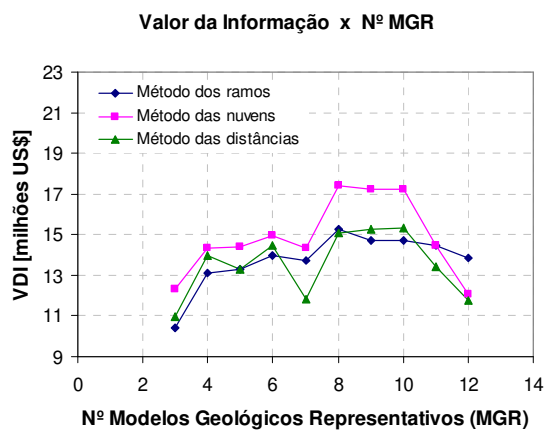
(b) Árvore de decisão simplificada.

Figura 4.59. Exemplo de árvores de derivação e decisão simplificadas com 12 MGR.

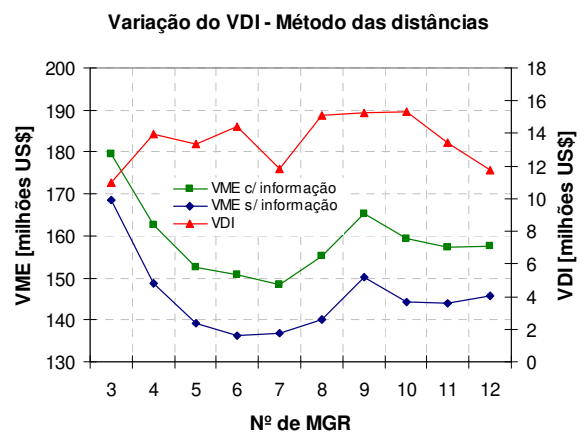
A utilização dos MGR para a geração da curva de risco, para o cálculo do VME do projeto e para o cálculo do percentis (P10, P50 e P90) mostrou resultados satisfatórios demonstrados por Schiozer *et al.* [2004] e Costa [2003]. Entretanto, a aproximação através do uso dos MGR para representar a árvore não é muito boa para este caso, representando apenas um cálculo aproximado que pode ser útil em algumas situações. A oscilação do VDI com a adição de modelos representativos ao cálculo mostra que, talvez, a utilização dos MGR no cálculo dos VME com e sem informação não seja a maneira mais precisa, mostrando-se muito sensível à variação entre os VME. De forma que, os MGR devem ser escolhidos, otimizados e utilizados na definição de diferentes estratégias de produção para o campo, mas não são suficientes para o cálculo do VDI. Portanto, outra maneira de calcular os VME com e sem informação é proposta através da

simulação de cada estratégia otimizada dos MGR para todos os modelos da árvore de derivação e decisão.

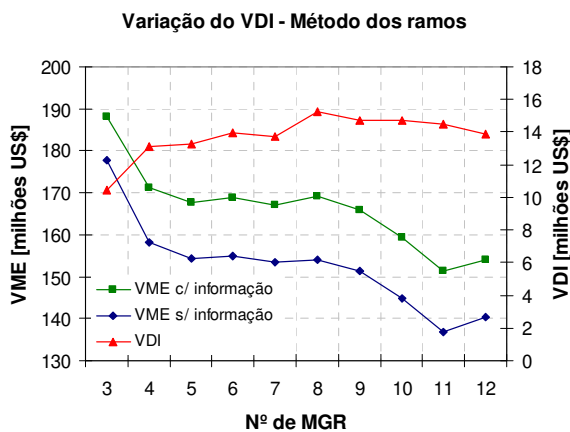
Estes resultados mostram também que, neste exemplo, a escolha de três modelos representativos, pode introduzir grandes erros no cálculo do valor da informação. Um número reduzido de modelos pode desconsiderar possíveis variações nas estratégias de produção do reservatório, proporcionando resultados errôneos.



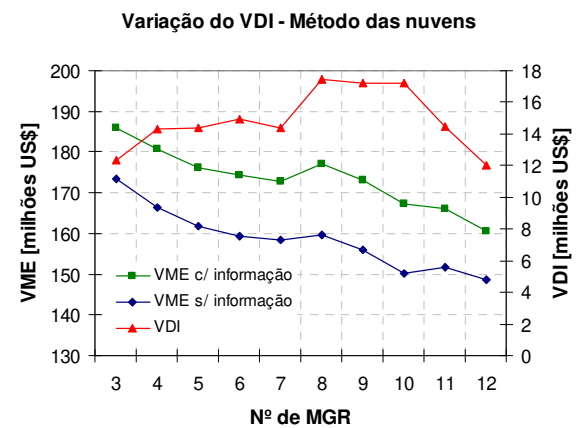
(a) Variação do VDI em função do número de modelos representativos.



(b) Variação do VDI, considerando o métodos das distâncias.



(c) Variação do VDI, considerando o métodos dos ramos.

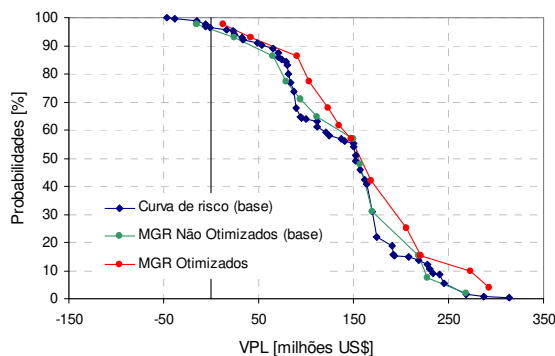


(d) Variação do VDI, considerando o métodos das nuvens.

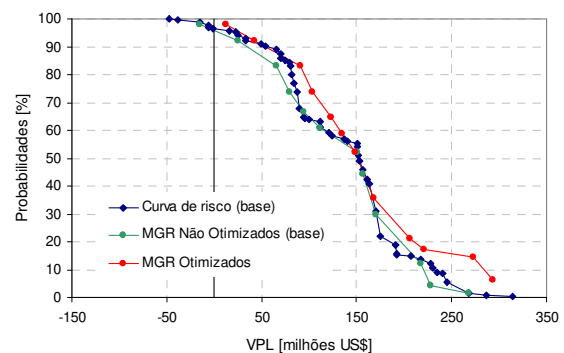
Figura 4.60. Variação do VDI e do VME com e sem informação para diferentes métodos de cálculo das probabilidades dos MGR.

O VME com informação pode aumentar ou não com a adição de novos MGR, mas deve-se analisar o comportamento de sua estratégia no cálculo do VME com e sem informação. A relação entre os VME com e sem informação determina o aumento ou a queda do VDI. Estes resultados podem ser melhor analisados com a escolha de um n° maior de MGR que estabilizem o VDI.

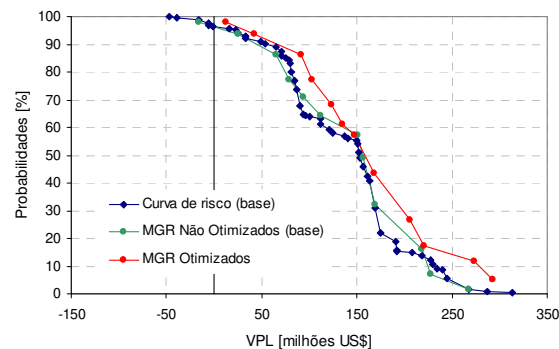
Pode-se analisar também a influência da otimização dos MGR na Figura 4.61. A curva de risco em azul corresponde à curva para a estratégia base. A curva em verde corresponde à curva de risco, calculada utilizando-se os modelos geológicos representativos (Itens (a), (b) e (c) para 12 MGR). Os pontos que simbolizam os MGR otimizados (curva vermelha) se deslocaram para a direita do eixo dos VPL após a otimização dos mesmos. Caso todos os modelos tivessem sido otimizados (com a informação), a curva de risco teria todos os seus pontos deslocados para a direita do eixo do VPL, neste exemplo. Pode-se observar que não houve diferenças discrepantes na curva de risco entre os três métodos de cálculo das probabilidades dos MGR.



(a) Curva de risco - método das distâncias.



(b) Curva de risco - método dos ramos.

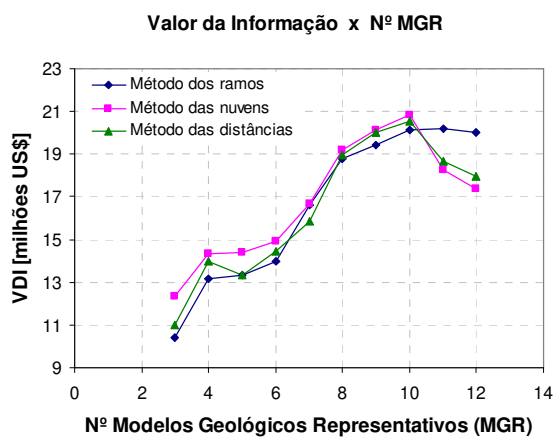


(c) Curva de risco - método das nuvens.

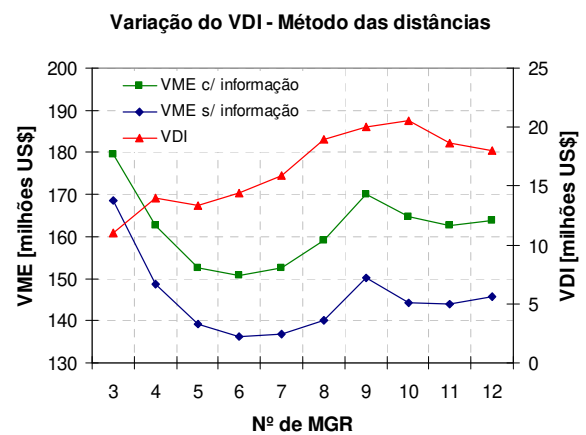
Figura 4.61. Curvas de risco considerando diferentes métodos de cálculo das probabilidades.

4.2.10.2 Resultados 2 – VDI completa para 4 atributos

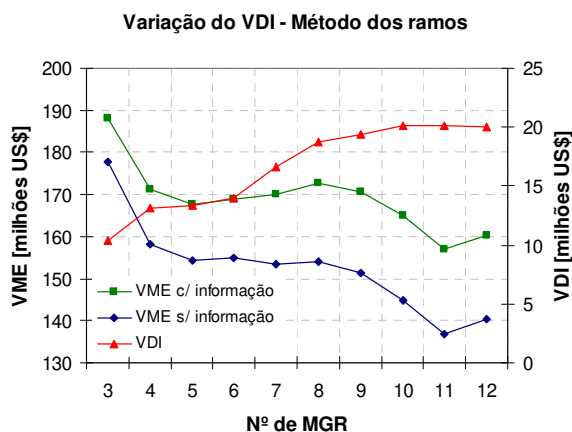
A Figura 4.62 (Item (a)) mostra os resultados do cálculo do valor da informação para os diferentes métodos de cálculo das probabilidades dos MGR. Os Itens (b), (c) e (d) mostram detalhes da variação do VDI e dos VME com e sem informação, com comportamentos semelhantes e com poucas variações entre os diferentes métodos, tendendo a um patamar.



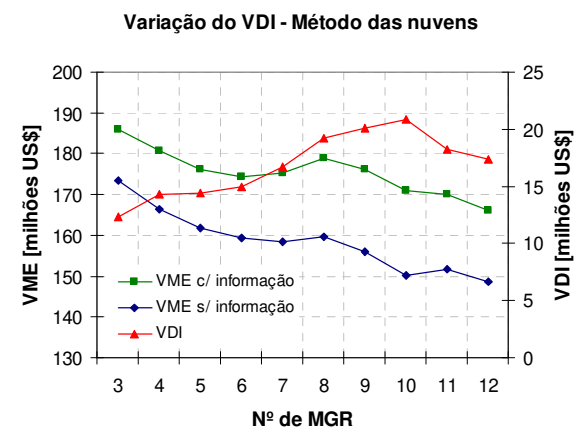
(a) Variação do VDI em função do número de modelos representativos.



(b) Variação do VDI, considerando o métodos das distâncias.



(c) Variação do VDI, considerando o métodos dos ramos.



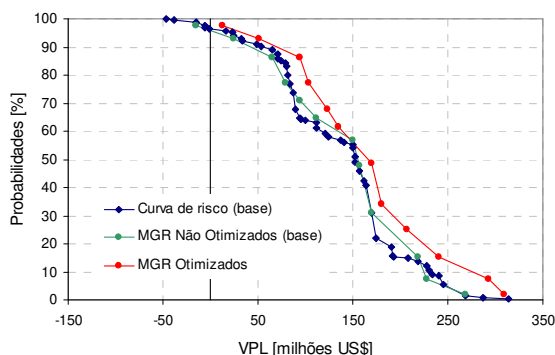
(d) Variação do VDI, considerando o métodos das nuvens.

Figura 4.62. Variação do VDI em função do n° de MGR e variação do VDI e do VME com e sem informação para diferentes métodos de cálculo das probabilidades dos MGR.

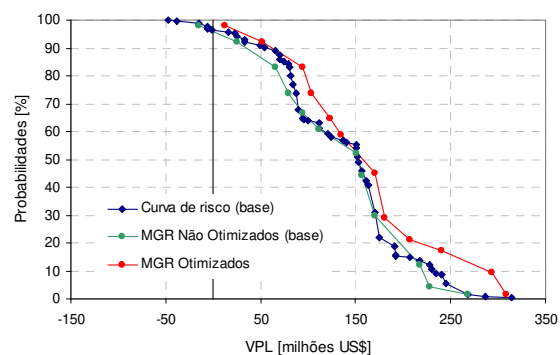
Os resultados demonstram que a escolha de três modelos representativos, como é feito normalmente na avaliação de projetos, pode causar erros no valor da informação em questão.

Pode-se notar que, comparada à Figura 4.60, Item (a), os VDI foram maiores porque mais informações foram obtidas a respeito do reservatório influenciando a definição da melhor estratégia (conhecida) para um número maior de grupos na árvore de decisão.

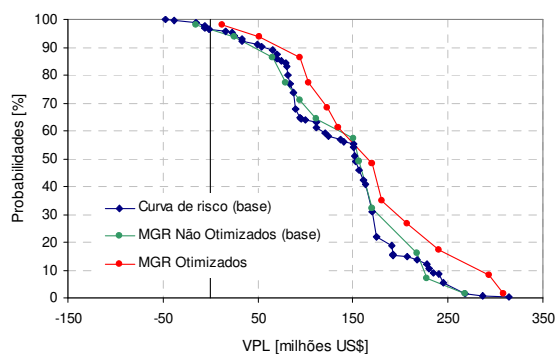
A Figura 4.63 mostra diferentes curvas de risco para cada método de cálculo das probabilidades de ocorrência dos 12 MGR. Esta figura se diferencia da Figura 4.61 (Itens (a), (b) e (c)) porque todas as 12 estratégias foram aplicadas na análise do VDI, ao contrário da análise anterior que usou somente das 6 melhores estratégias dentre as 12 analisadas. Pode-se observar um leve deslocamento, para a direita, das curvas vermelhas (com os MGR otimizados após a obtenção da informação) quando comparadas às curvas da Figura 4.61, o que representa um aumento no valor da informação.



(a) Método das distâncias - 12 MGR.



(b) Método dos ramos - 12 MGR.



(c) Método das nuvens - 12 MGR.

Figura 4.63. Curvas de risco considerando diferentes métodos de cálculo das probabilidades.

4.2.11 Comparação entre métodos

Uma comparação dos VDI e do número de simulações realizadas no processo de cálculo foi realizada entre quatro métodos, dois propostos por este trabalho e dois utilizados na indústria ou na literatura. O caso analisado corresponde ao resultado do cálculo do VDI com 12 MGR considerando que a informação reduz completamente a incertezas de 2 atributos (dwoc, areas) e 4 atributos (dwoc, areas, por e permx). A Tabela 4.8 mostra que o método DSS utilizado por Floris *et al.* [2000] e por Portella *et al.* [2003], descrito na revisão bibliográfica, sub-avalia o VDI. Outro método que é utilizado na indústria calcula o VDI através de 3 modelos representativos, o que também sub-avalia seu valor. O método dos MGR é um método mais simplificado mas válido para análise de forma que sua precisão pode ser aumentada com o aumento do número de

modelos representativos com o mesmo número de estratégias otimizadas. Já o método da Árvore Completa é o método mais confiável e preciso proposto por este trabalho.

Tabela 4.8. Cálculo do VDI para 12 MGR.

	2 atributos		4 atributos	
	VDI [milhões US\$]	nº de simulações	VDI [milhões US\$]	nº de simulações
Método DSS	0,00	$54 + (\sim 25) = 81$	1,75	$54 + (\sim 25) = 81$
Método 1 Árvore Completa	8,00	948	15,21	948
Método 2 Método dos MGR	17,99	444	11,76	444
3 modelos	5,74	84	8,80	84

4.2.12 Discussões finais

O número de grupos da árvore de derivação/decisão (G) e o número de modelos ou cenários por grupo (N_G) são função do tipo de informação que será eventualmente obtida, conseqüentemente, do número de variáveis passíveis de redução de incerteza. Quando a informação elimina a incerteza de um maior número de atributos na árvore, maior o número de grupos alocados na árvore e, conseqüentemente, menor o número de modelos por grupo. Com o aumento do número de grupos, existe um número maior de estratégias mais adequadas a cada grupo, requerendo um número maior de modelos representativos com suas estratégias otimizadas⁹. Porém, há um limite com relação ao número de MGR devido à necessidade da simplificação para viabilizar o processo de cálculo do VDI.

Quanto maior o número de MGR e estratégias maior a precisão e confiabilidade no processo de cálculo. O aumento do número de MGR e de estratégias resulta em maiores VME (com e sem informação), entretanto, há uma tendência de que o aumento do VME com informação seja maior que o aumento do VME sem informação porque cada grupo possui uma estratégia mais adequada e específica para os modelos do grupo, ou seja, uma estratégia que

⁹ Outros fatores que também influenciam a necessidade do aumento do número de MGR devem ser analisados, para maiores detalhes vide Item 3.1.6 Escolha dos Modelos Representativos.

maximiza o VME do grupo, favorecendo o VME com informação em detrimento ao sem informação. Por isso, os processos que simplificam o processo, normalmente subestimam o cálculo do VDI.

O valor da informação pode oscilar ao longo do processo de cálculo com a adição gradativa de MGR e estratégias devido a escolha de modelos ou estratégias que influenciam mais o aumento do VME sem informação comparado ao com informação, mas tendendo a um patamar (estabilização do VDI).

A Figura 4.64 mostra uma comparação entre os métodos de cálculo dos VME com e sem informação em função do número de simulações realizadas e o número de estratégias otimizadas (de 3 a 12). Pode-se observar que o método da Árvore Completa exige um número de simulações muito maior do que o método dos MGR. Porém, é um método mais confiável e preciso. A definição de qual método a ser utilizado deve ser ponderado pela relação custo-benefício. Quanto maior a confiabilidade do processo maior o custo computacional exigido.

Somente a título de exemplo a Figura 4.65 mostra um gráfico idêntico ao da Figura 4.64, mas para o caso em que todas as 54 estratégias de produção são otimizadas, o que é inviável na prática devido ao grande número de simulações necessárias. Como alternativa pode-se adotar um método intermediário aos dois métodos de cálculo dos VME propostos, ou seja, a escolha de um número de MGR entre 12 e 54 com um número de estratégia reduzido, por exemplo 12. O gráfico apresenta 5 curvas: a azul escura corresponde ao método da árvore completa, a rosa ao método dos MGR e as outras três correspondem à métodos intermediários sugeridos com o objetivo de aumentar a precisão e confiabilidade do processo e diminuir o número de simulações.

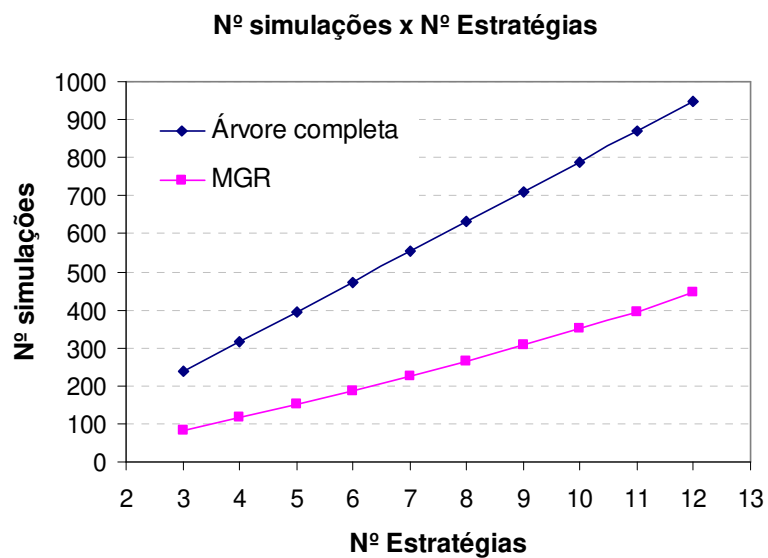


Figura 4.64. Nº de simulações em função do nº de estratégias otimizadas para os métodos da Árvore Completa e dos MGR.

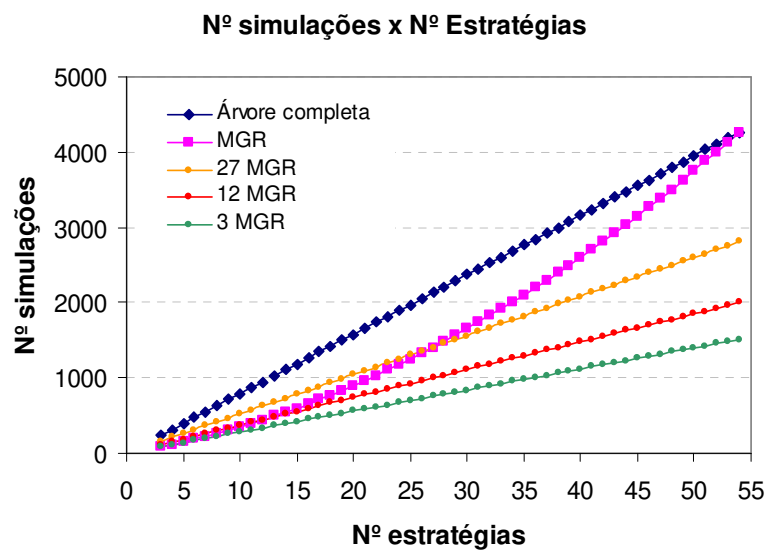


Figura 4.65. Nº de simulações em função do nº de estratégias otimizadas.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

Este trabalho desenvolveu uma metodologia de quantificação de valor de informação aplicada ao desenvolvimento de campos de petróleo. As principais conclusões estão resumidas abaixo. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. No entanto, pela complexidade do assunto, pode-se verificar ainda muitos assuntos a serem pesquisados, como complementação desta metodologia; alguns deles estão listados neste capítulo, após as conclusões.

5.1 Conclusões

As principais observações com relação ao estudo detalhado abordado foram:

- A quantificação de valor de informação (VDI) e flexibilização (VDF) para o desenvolvimento de campos de petróleo é um processo complexo, devido:
 - ao grande número de incertezas e variáveis envolvidas,
 - à necessidade de modelagem precisa do campo, e
 - à necessidade de integração com o processo de seleção de escolha de estratégia de produção para os possíveis cenários.
- Embora alguns trabalhos possam ser encontrados na literatura sobre o assunto, a maioria se aplica à fase de exploração com modelagem mais simples. Os trabalhos aplicados às fases de avaliação e desenvolvimento de campos não detalham suficientemente o procedimento, ou simplificam o problema, com possíveis erros na quantificação do VDI.

- O processo completo de quantificação do VDI envolveria a otimização da estratégia de produção para um grande número de modelos, o que é inviável na prática.
- A metodologia proposta neste trabalho viabiliza e acelera o processo através da utilização de modelos geológicos representativos (MGR).
- O utilização dos MGR pode ser subdividida em duas etapas independentes: na escolha de estratégias de produção adequadas a cada cenário passível de informação e para representar a árvore de decisão. No primeiro caso os MGR se mostraram bastante úteis. No segundo caso, a simplificação pode causar erros significativos e a sua aplicação fica condicionada a precisão requerida dos resultados.
- A precisão e a confiabilidade do cálculo do VDI são garantidas:
 - pelo número de MGR e de estratégias otimizadas,
 - pela precisão utilizada no processo de otimização de estratégia, e
 - pelo critério de distribuição de probabilidades dos MGR (para o caso de uso dos MGR para representar a árvore).
- O processo de cálculo do valor da informação:
 - deve ser dinâmico e gradativo na determinação dos modelos geológicos representativos até a estabilização (para que seja feito de forma eficiente);
 - pode apresentar erros significativos com a simplificação para 3 modelos - um pessimista, um provável e um otimista (por vezes utilizado na indústria) e na literatura (como o método DSS citado neste trabalho).
- A escolha dos modelos representativos depende:
 - do número de variáveis passíveis de redução de incerteza, juntamente com seus respectivos níveis, isto é, quanto maior o número de parâmetros que terão suas incertezas eliminadas ou reduzidas através da obtenção de novas informações, maior deve ser o número de modelos representativos;
 - da disposição da nuvem de pontos no gráfico VPL *versus* FR, estando dispersos ou concentrados, o que significa uma diferença grande ou não entre os valores de VPL e FR e, conseqüentemente, uma diferença nas possíveis estratégias de produção;

- de quão concentradas estão as probabilidades de ocorrência de cada modelo, ou seja, altas probabilidades de ocorrência concentradas em determinados modelos devem ser diluídas em um número maior de modelos;
 - da necessidade e importância que o projeto representa para a empresa, ou seja, do nível de confiança que se deseja obter no processo, pois, quanto maior o número de modelos representativos, maior a precisão e confiabilidade no cálculo, e
 - do tempo disponível para a realização do cálculo e análise do valor da informação.
- O modelo base (mais provável) deve ser bem otimizado, para evitar mais de uma iteração, como a re-otimização do modelo base, conforme descrito na Figura 3.1, já que o processo é demorado. Isto é determinado após a otimização de todos os modelos representativos e a substituição de cada estratégia otimizada em cada MGR. Cada MGR também deve ser bem otimizado para aumentar a confiabilidade no processo.
- O estudo com vários modelos geológicos representativos mostrou que a utilização de poucos modelos representativos pode causar erros devido à desconsideração de diferentes e possíveis estratégias de produção. Com o crescimento do número de modelos, o valor tende a se estabilizar, pois as diferenças entre as estratégias decrescem.
- Os MGR:
 - são úteis para gerar estratégias
 - são confiáveis na geração da curva de risco
 - são confiáveis no cálculo do VME do projeto
 - são confiáveis no cálculo do percentis (P10, P50 e P90)
 - geram erros para substituir a árvore para calcular o VDI
- Quanto ao cálculo do VME com e sem informação
 - A utilização dos MGR no cálculo dos VME com e sem informação mostrou-se muito sensível à variação de suas respectivas probabilidades de ocorrência influenciando fortemente o VDI.
 - O método que utiliza as estratégias otimizadas dos MGR e a árvore de derivação/decisão completa para o cálculo do VME mostrou-se mais estável e confiável devido à consideração de todos os modelos da árvore. Contudo, o tempo de simulação aumenta significativamente com o número de atributos passíveis de

redução de incerteza e o número de MGR (estratégias otimizadas), tornando-se inviável em alguns casos. É muito útil na presença de processos automatizados.

- O Método dos MGR é simplificado, menos preciso e útil para casos em que as simulações são lentas. Deve-se desvincular o nº de MGR e o nº de estratégias no processo para aumentar sua confiabilidade.
- Foram estudados três métodos de atribuição de probabilidades aos MGR. Nenhum dos 3 métodos mostrou resultados muito bons quando comparados com o método completo para o cálculo do VME.
- A variação do VDI é fortemente dependente do comportamento dos VME com e sem informação, de forma que o método mais confiável para este cálculo é a utilização das estratégias otimizadas dos MGR e da árvore de derivação/decisão completa. Para casos em que isso não é viável, a utilização dos MGR no cálculo do valor da informação é aplicável.
- Os resultados mostram que a metodologia proposta pode ser aplicada para casos simples e para casos mais complexos, em que o número de variáveis é expressivo. Considerando-se a análise de reservatórios na fase de avaliação e desenvolvimento, a metodologia de análise do valor da informação é uma ferramenta de análise de decisão de grande importância e, mesmo que seja um processo demorado, o processo mais confiável pode ser justificado;
- Possíveis aplicações adicionais para o cálculo de VDI:
 - Decisão de qual informação deve ser obtida, como função dos atributos passíveis de redução de incerteza;
 - O valor da informação também pode ser utilizado como critério de parada no processo de avaliação no desenvolvimento de campos de petróleo.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros estão listadas a seguir:

- Estudar a influência de outros tipos de incertezas, principalmente econômicas, na análise do valor da informação;

- O valor de flexibilização foi mostrado apenas para casos simples (Exemplos 1 e 2). Seria interessante estudar e aplicar a metodologia para o cálculo do VDF para casos complexos;
- Tentar melhorar o critério de escolha dos MGR, para minimizar o número de modelos necessários e automatizar o processo;
- Explorar a utilização dos MGR e de suas probabilidades no cálculo dos VME com e sem informação.
- Aplicar a metodologia para outros casos, para verificar o comportamento do VDI e VDF como função dos modelos geológicos representativos.

Referências Bibliográficas

- AYLOR JR., W. K., *Measuring the Impact of 3-D Seismic on Business Performance*. SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, Texas, U.S.A., SPE 52970, Março, 1999.
- BEGG, S., BRATVOLD, R., CAMPBELL, J., *Improving Investment Decisions Using a Stochastic Integrated Asset Model*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, U.S.A., SPE 71414, Setembro/Outubro, 2001.
- BEGG, S., BRATVOLD, R., CAMPBELL, J., *The Value of Flexibility in Managing Uncertainty in Oil and Gas Investments*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, U.S.A., SPE 77586, Setembro/Outubro, 2002.
- COOPERSMITH, E. M., CUNNINGHAM, P. C., *A Practical Approach to Evaluating the Value of Information and Real Option Decisions in the Upstream Petroleum Industry*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, U.S.A., SPE 77582, Setembro/Outubro, 2002.
- COSTA, A. P. A., *Quantificação do Impacto de Incertezas e Análise de Risco no Desenvolvimento de Campos de Petróleo*. Campinas, 2003. 240pp. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2003.

- COSTA, A. P. A., Schiozer, D. J., *Treatment of Geological Attributes in Risk Analysis Applied to the Appraisal Phase of Petroleum Fields*. Canadian International Petroleum Conference, Junho, Calgary, Alberta, Canadá, 2003.
- CLEMEN, R. T., *Making Hard Decisions – An Introduction to Decision Analysis*. Belmont: Duxbury, 1995, 664pp.
- DEMIRMEN, F., *Use of “Value of Information” Concept in Justification and Ranking of Subsurface Appraisal*. SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Denver, U.S.A., SPE 36631, Outubro, 1996.
- DEMIRMEN, F., *Subsurface Appraisal: The Road from Reservoir Uncertainty to Better Economics*. SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, U.S.A., SPE 68603, Abril, 2001.
- DEZEN, F., MOROOKA, C. K., *Field Development Decision Making Under Uncertainty: A Real Option Valuation Approach*. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, SPE 69595, Março, 2001.
- DEZEN, F., MOROOKA, C. K., *Real Options Applied to Selection of Technological Alternative for Offshore Oilfield Development*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, U.S.A., SPE 77587, Outubro, 2002.
- DEJEAN, J. P., BLANC, G., *Managing Uncertainties on Production Predictions Using Integrated Statistical*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, U.S.A., SPE 56696, Outubro, 1999.
- DUNN, M. D., *A Method to Estimate the Value of well Log Information*. SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Washington, U.S.A., SPE 24672, Outubro, 1992.

- FLORIS, F. J. T., PEERSMANN, M. R. H. E., *E&P Decision System for Asset Management – A case study*. SPE European Petroleum Conference, Paris, França, SPE 65146, Outubro, 2000.
- GENTRY, D. W., O'NEIL, T. J., *Mine investment analysis*. New York: SME, 1984, 502pp.
- GERHARDT, J. H., HALDORSEN DANOP, HALDORSEN H. H., *On the Value of Information*. Offshore Europe 89, Aberdeen, SPE 19291, Setembro, 1989.
- GRANT, E. L., IRESO, W. G., *Principles of Engineering Economy*. New York: The Ronald Press Company, 1970, 640pp.
- GROEBNER, D. F., SHANNON, P. W., *Business statistics: a decision-making approach*. New York: MacMillan, 1993, 1119pp.
- IATCHUK, S. (iatchuk@dep.fem.unicamp.br), *Algumas Observações Sobre Flexibilização do Número de Poços em Projetos de Desenvolvimento – Campos Marítimos*. 25, mar., 2004. Enviado por e-mail. Mensagem para: SCHIOZER, D. J. (denis@dep.fem.unicamp.br).
- JENSEN, T. B., *Estimation of Production Forecast Uncertainty for a Mature Production License*. SPE Annual Technical Conference and Exhibitions, New Orleans, USA, SPE 49091, Setembro, 1998.
- KONINX, J. P. M., *Value of Information: From Cost Cutting to Value Creation*. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, SPE 64390, Outubro, 2000.
- LIGERO, E. L., SCHIOZER, D. J., *Exploration and Production Risk Analysis - Automated Methodology and Parallel Computing to Speedup the Process*. Second Meeting on Reservoir Simulation, Buenos Aires, Argentina, Novembro, 2002.

- LIGERO, E. L., MASCHIO, C., SCHIOZER, D. J., *Quantifying the Impact of Grid Size, Upscaling, and Streamline in the Risk Analysis Applied to Petroleum Field*, 17th Reservoir Simulation Symposium, SPE 79677, Fevereiro, Houston, USA, 2003.
- LOHRENZ, J., *Net Values of Our Information*. JPT – Journal of Petroleum Technology, Abril, 1988.
- LOSCHIAVO, R., *Estimativas de Incertezas na Previsão de Desempenho de Reservatórios*. Campinas, 1999. 86pp. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 1999.
- MIAN, M. A., *Project Economics and Decision Analysis – Volume II: Probabilistic Models*, Penn Well Corporation, Tulsa, Oklahoma, 2002, 411pp.
- NEWENDORP, P. D., *Decision Analysis for Petroleum Exploration*. Penn Well Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, 1975, 606pp.
- PORTELLA, R. C. M., SALOMÃO, M. C., BLAUTH, M., DUARTE, R. L. B., *Uncertainty Quantification to Evaluate the Information in a Deepwater Reservoir*. SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, U.S.A., SPE 79707, Fevereiro, 2003.
- ROSE, P. R., *Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures*. AAPG Methods In Exploration Series, nº 12, 2001, 164pp.
- SALOMÃO, M.C., GRELL, A.P., *Uncertainty in Production Profiles on the Basis of Geostatistic Characterization and Flow Simulation*. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, SPE 69477, Março. 2001.
- SANTOS, J. A., *Curso de Engenharia Econômica – Análise de Risco – Fase 2*, Rio de Janeiro, SEREC Petrobrás, 1988.

SANTOS, J. A. M., *Estudo da Influência da Estratégia de Produção em Análise de Risco de Projetos de E&P*. Campinas, 2002. 140pp. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2002.

SANTOS, J. A. M., SCHIOZER, D. J., *Quantifying Production Strategy Impact in Risk Analysis of an E&P Project Using Reservoir Simulation*, 17th Reservoir Simulation Symposium, SPE 79679, Fevereiro, Houston, USA, 2003.

SCHIOZER, D. J., LIGERO, E. L., SUSLICK, S. B., Costa, A. P. A. e Santos, J. A. M., *Use of Representative Models in the Integration of Risk Analysis and Production Strategy Definition*, JPSE. Journal of Petroleum Science and Engineering, pp131-141, número 1-2, vol. 44, Outubro, 2004.

STEAGALL, D. E., *Análise de risco nas previsões de produção com simulação numérica de fluxo – Exemplo de um campo na fase de delimitação*. Campinas, 2001. 89pp. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2001.

STERMOLE, F. J., STERMOLE, J. M., *Economic Evaluations and Investment Decision Methods*. Golden: Investment Evaluation, 1974, 353pp.

STEVENSON, W. J., *Estatística Aplicada à Administração*. São Paulo, SP: Editora Harbra, 1986, 495pp.

SUSLICK, S. B., *Métodos de Avaliação Econômica de Jazidas Minerais*. Organizado por YAMAMOTO, J. K. Avaliação e Classificação de Jazidas Minerais. Cap. 8, São Paulo, EDUSP, 2001.

WARREN., *Development Decision: Value of Information*. Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas, U.S.A., SPE 11312, Março, 1983.

Anexo 1

Exemplos I e II

Curvas de Permeabilidade Relativa

Óleo – Água

Curvas de permeabilidade relativa

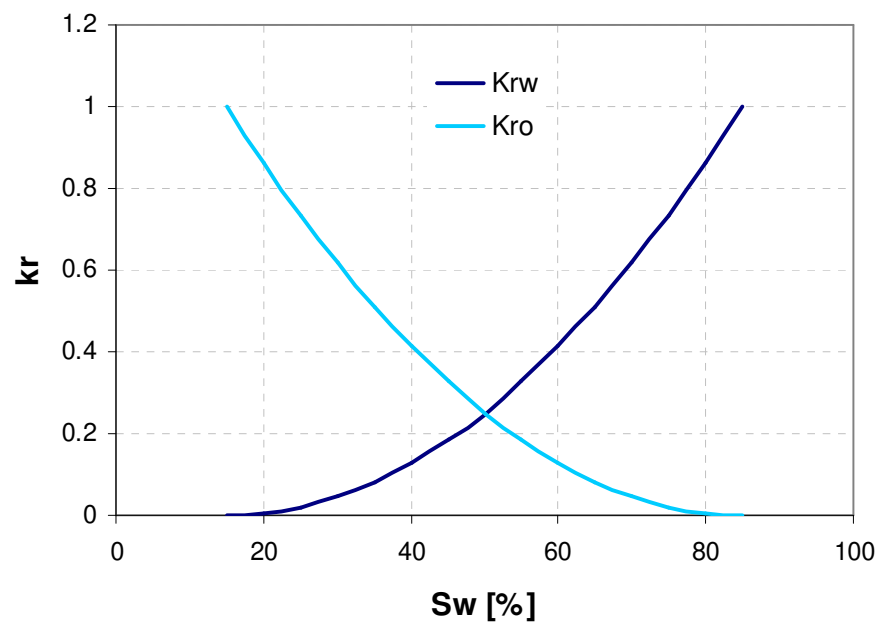


Tabela PVT

Pressão	Razão de Solubilidade	Fator Volume de Formação do óleo	Viscosidade do óleo	Fator Volume de Formação do gás	Viscosidade do gás
[kgf/cm ²]	[m ³ std/m ³ std]	[m ³ res/m ³ std]	[cp]	[m ³ res/m ³ std]	[cp]
1,034	0,178	1,062	1,04	0,935453695	0,008
18,611	16,119	1,15	0,975	0,067902492	0,0096
36,188	32,059	1,207	0,91	0,035227393	0,0112
71,342	66,077	1,295	0,83	0,017950743	0,014
141,651	113,275	1,435	0,695	0,009062322	0,0189
176,805	138,032	1,5	0,641	0,007265594	0,0208
211,96	165,638	1,565	0,594	0,006064024	0,0228
282,268	226,194	1,695	0,51	0,00455363	0,0268
352,577	288,175	1,827	0,449	0,003644023	0,0309
633,811	531,467	2,357	0,203	0,002167322	0,047

Anexo 2

Exemplo III

Processo de otimização dos modelos representativos

Otimização do Modelo Representativo 1 (Modelo Base).

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	86,14	45,55
Rodada 1 - Fechamento dos poços PO-002, PO-003 e AA-119	102,30	45,51
Rodada 2 - Reordenação do cronograma de abertura de poços	111,55	45,63
Rodada 3 - Fechamento do poço PO - 007	120,04	45,51
Rodada 4 - Fechamento do poço PO - 008	122,73	44,61
Rodada 5 - Fechamento do poço PI - 017	134,24	42,99
Rodada 6 - Fechamento do poço PI - 018	143,35	41,97
Rodada 7 - Fechamento do poço PI - 014	144,35	41,09
Rodada 8 - Fechamento do poço PI - 015	148,51	36,44
Rodada 9 - Realocação do poço injetor PI - 009	158,56	37,67
Rodada 10 - Realocação do poço produtor PO - 013	159,63	37,66
Rodada 11 - Realocação do poço injetor PI - 020	166,60	38,66
Rodada 12 - Realocação do poço produtor PO - 005	167,55	38,64
Rodada 13 - Realocação do poço produtor PO - 004	169,72	39,05
Rodada 14 - Realocação do poço injetor PI - 016	169,73	39,07
Modelo Otimizado	169,73	39,07
Incremento [%]	49,25	

Modelo Representativo 1 (Modelo Base).	
Número de rodadas positivas	14
Número de rodadas negativas	15
Número total de rodadas	29

Otimização do Modelo Representativo 2.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	111,87	45,22
Rodada 1 - Realocação do poço injetor PI - 016	112,36	42,96
Rodada 2 - Realocação do poço produtor PO - 005	114,88	45,02
Rodada 3 - Realocação do poço injetor PI - 019	115,07	45,12
Rodada 4 - Realocação do poço injetor PI - 016	115,24	45,34
Rodada 5 - Realocação do poço injetor PI - 019	115,99	45,43
Modelo Otimizado	115,99	45,43
Incremento [%]	3,55	

Modelo Representativo 2.	
Número de rodadas positivas	5
Número de rodadas negativas	22
Número total de rodadas	27

Otimização do Modelo Representativo 3.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	268,15	20,59
Rodada 1 - Abertura do poço injetor PI - 015	280,21	24,21
Rodada 2 - Realocação do poço injetor PI - 020	285,87	24,83
Rodada 3 - Realocação do poço produtor PO - 005	290,26	24,98
Rodada 4 - Realocação do poço produtor PO - 013	294,41	21,42
Rodada 5 - Troca da abertura dos poços PI - 016 e PI - 009	295,09	25,12
Rodada 6 - Realocação do poço injetor PI - 019	295,36	25,17
Rodada 7 - Realocação do poço injetor PI - 015	299,51	25,37
Rodada 8 - Realocação do poço injetor PI - 009	299,79	25,41
Rodada 9 - Realocação do poço injetor PI - 020	300,04	25,40
Rodada 10 - Realocação do poço injetor PI - 019	300,80	25,48
Rodada 11 - Realocação do poço injetor PI - 016	301,06	25,47
Rodada 12 - Realocação do poço produtor PO - 005	301,32	25,44
Rodada 13 - Realocação do poço injetor PI - 009	301,43	25,37
Rodada 14 - Realocação do poço injetor PI - 009	301,98	25,40
Rodada 15 - Realocação do poço injetor PI - 020	305,41	25,66
Rodada 16 - Realocação do poço injetor PI - 016	305,51	25,63
Rodada 17 - Realocação do poço injetor PI - 019	307,45	25,86
Rodada 18 - Realocação do poço produtor PO - 005	307,99	25,89
Rodada 19 - Realocação do poço injetor PI - 015	308,98	25,94
Modelo Otimizado	308,98	25,94
Incremento [%]	13,21	

Modelo Representativo 3.	
Número de rodadas positivas	19
Número de rodadas negativas	21
Número total de rodadas	40

Otimização do Modelo Representativo 4.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	79,39	30,65
Rodada 1 - Realocação do poço injetor PI - 020	82,30	31,34
Rodada 2 - Realocação do poço produtor PO - 004	85,26	31,61
Rodada 3 - Realocação do poço produtor PO - 005	85,78	31,64
Rodada 4 - Realocação do poço produtor PO - 010	86,34	31,87
Rodada 5 - Realocação do poço injetor PI - 020	88,45	32,38
Rodada 6 - Realocação do poço produtor PO - 004	90,83	32,65
Rodada 7 - Realocação do poço injetor PI - 009	91,52	32,74
Rodada 8 - Realocação do poço injetor PI - 020	92,61	32,95
Rodada 9 - Fechamento do poço injetor PI - 019	100,67	31,80
Rodada 10 - Reordenação do cronograma de abertura de poços	103,39	31,88
Modelo Otimizado	103,39	31,88
Incremento [%]	23,21	

Modelo Representativo 4.	
Número de rodadas positivas	10
Número de rodadas negativas	18
Número total de rodadas	28

Otimização do Modelo Representativo 5.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	-15,67	47,74
Rodada 1 - Fechamento do poço injetor PI - 016	-3,94	38,83
Rodada 2 - Realocação do poço produtor PO - 006	2,84	39,08
Rodada 3 - Reordenação do cronograma de abertura de poços	6,38	39,26
Rodada 4 - Realocação do poço produtor PO - 010	7,47	39,33
Rodada 5 - Realocação do poço injetor PI - 019	9,22	39,29
Rodada 6 - Realocação do poço produtor PO - 004	9,80	39,34
Rodada 7 - Realocação do poço produtor PO - 013	10,27	39,43
Rodada 8 - Realocação do poço produtor PO - 005	11,65	39,57
Rodada 9 - Realocação do poço produtor PO - 005	11,91	39,55
Rodada 10 - Realocação do poço produtor PO - 013	12,47	39,67
Modelo Otimizado	12,47	39,67
Incremento [%]	225,66	

Modelo Representativo 5.	
Número de rodadas positivas	10
Número de rodadas negativas	10
Número total de rodadas	20

Otimização do Modelo Representativo 6.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	94,27	18,46
Rodada 1 - Abertura do poço injetor PI - 015	98,73	22,73
Rodada 2 - Realocação do poço injetor PI - 020	106,96	24,00
Rodada 3 - Fechamento do poço produtor PO - 005	107,97	23,62
Rodada 4 - Realocação do poço injetor PI - 019	109,44	23,95
Rodada 5 - Abertura do poço produtor PO - 008	123,13	25,07
Rodada 6 - Realocação do poço produtor PO - 013	125,05	25,16
Rodada 7 - Realocação do poço produtor PO - 013	125,79	25,24
Rodada 8 - Realocação do poço produtor PO - 004	127,33	25,37
Rodada 9 - Realocação do poço injetor PI - 015	128,09	25,41
Rodada 10 - Realocação do poço injetor PI - 016	129,08	25,44
Rodada 11 - Realocação do poço produtor PO - 008	130,63	25,55
Rodada 12 - Realocação do poço produtor PO - 013	132,02	25,58
Rodada 13 - Realocação do poço injetor PI - 020	132,81	25,72
Rodada 14 - Realocação do poço injetor PI - 019	133,77	25,95
Rodada 15 - Realocação do poço injetor PI - 009	134,71	26,10
Rodada 16 - Realocação do poço produtor PO - 004	134,73	26,08
Rodada 17 - Realocação do poço injetor PI - 019	134,69	26,06
Modelo Otimizado	134,69	26,06
Incremento [%]	30,01	

Modelo Representativo 6.	
Número de rodadas positivas	17
Número de rodadas negativas	9
Número total de rodadas	26

Otimização do Modelo Representativo 7.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	150,45	24,58
Rodada 1 - Fechamento do poço injetor PI - 016	155,36	21,32
Rodada 2 - Realocação do poço injetor PI - 020	156,77	21,58
Rodada 3 - Realocação do poço injetor PI - 019	157,45	21,71
Rodada 4 - Abertura do poço produtor PO - 007	164,86	21,80
Rodada 5 - Realocação do poço produtor PO - 005	164,87	21,79
Rodada 6 - Realocação do poço produtor PO - 013	165,37	21,80
Rodada 7 - Realocação do poço injetor PI - 020	166,16	21,91
Rodada 8 - Realocação do poço injetor PI - 019	166,39	22,00
Rodada 9 - Abertura do poço injetor PI - 016	166,62	25,02
Rodada 10 - Realocação do poço injetor PI - 019	166,88	25,07
Rodada 11 - Realocação do poço produtor PO - 004	167,42	25,07
Rodada 12 - Realocação do poço injetor PI - 020	170,49	25,62
Rodada 13 - Realocação do poço injetor PI - 019	176,68	24,17
Rodada 14 - Antecipar abertura de poços	179,83	24,28
Rodada 15 - Fechamento do poço injetor PI - 016	180,22	21,32
Modelo Otimizado	180,22	21,32
Incremento [%]	16,52	

Modelo Representativo 7.	
Número de rodadas positivas	15
Número de rodadas negativas	19
Número total de rodadas	34

Otimização do Modelo Representativo 8.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	156,99	34,20
Rodada 1 - Abertura do poço injetor PI - 015	189,97	44,48
Rodada 2 - Troca na abertura dos poços injetores PI - 016 e PI - 009	205,66	46,44
Rodada 3 - Realocação do poço produtor PO - 005	205,75	46,46
Modelo Otimizado	205,75	46,46
Incremento [%]	23,70	

Modelo Representativo 8.	
Número de rodadas positivas	3
Número de rodadas negativas	17
Número total de rodadas	20

Otimização do Modelo Representativo 9.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	218,06	26,07
Rodada 1 - Abertura do poço injetor PI - 015	271,30	34,45
Rodada 2 - Abertura do poço injetor PI - 017	291,75	39,03
Rodada 3 - Realocação do poço produtor PO - 005	293,05	39,17
Modelo Otimizado	293,05	39,17
Incremento [%]	25,59	

Modelo Representativo 9.	
Número de rodadas positivas	3
Número de rodadas negativas	15
Número total de rodadas	18

Otimização do Modelo Representativo 10.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	24,99	34,63
Rodada 1 - Fechamento do poço injetor PI - 016	36,97	29,76
Rodada 2 - Realocação do poço injetor PI - 020	38,29	30,24
Rodada 3 - Realocação do poço injetor PI - 019	38,88	30,41
Rodada 4 - Realocação do poço produtor PO - 005	39,36	30,37
Rodada 5 - Realocação do poço injetor PI - 020	38,29	30,24
Rodada 6 - Realocação do poço injetor PI - 019	39,88	30,50
Rodada 7 - Realocação do poço produtor PO - 004	41,77	30,62
Rodada 8 - Realocação do poço injetor PI - 020	43,31	31,35
Rodada 9 - Fechamento do poço injetor PI - 019	49,35	28,94
Rodada 10 - Antecipar abertura de poços	51,44	29,03
Modelo Otimizado	51,44	29,03
Incremento [%]	51,42	

Modelo Representativo 10.	
Número de rodadas positivas	10
Número de rodadas negativas	8
Número total de rodadas	18

Otimização do Modelo Representativo 11.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	65,29	38,41
Rodada 1 - Abertura do poço injetor PI - 015	81,44	50,41
Rodada 2 - Troca na abertura dos poços injetores PI - 016 e PI - 009	90,96	51,63
Rodada 3 - Realocação do poço injetor PI - 019	92,24	51,79
Rodada 4 - Realocação do poço produtor PO - 013	93,81	52,07
Modelo Otimizado	93,81	52,07
Incremento [%]	30,40	

Modelo Representativo 11.	
Número de rodadas positivas	4
Número de rodadas negativas	17
Número total de rodadas	21

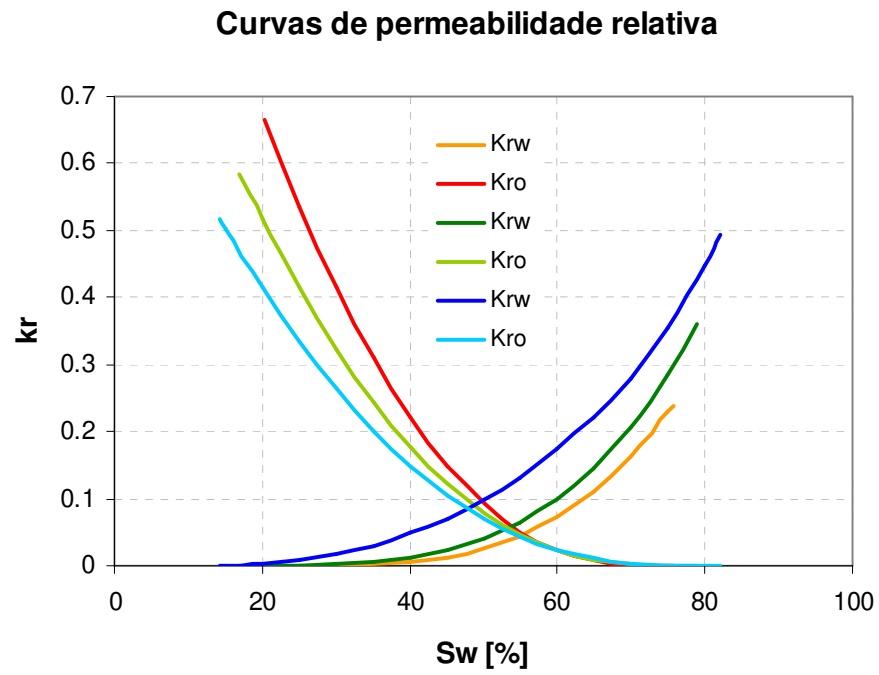
Otimização do Modelo Representativo 12.

	VPL [milhões US\$]	FR [%]
Modelo Inicial	227,27	32,02
Rodada 1 - Abertura do poço injetor PI - 015	228,53	36,29
Rodada 2 - Realocação do poço injetor PI - 019	231,40	36,77
Rodada 3 - Realocação do poço injetor PI - 020	232,98	36,87
Rodada 4 - Realocação do poço produtor PO - 004	233,86	37,12
Rodada 5 - Realocação do poço injetor PI - 019	235,59	37,39
Rodada 6 - Realocação do poço produtor PO - 005	235,73	37,42
Rodada 7 - Realocação do poço produtor PO - 010	236,87	37,62
Rodada 8 - Realocação do poço injetor PI - 019	238,75	37,95
Rodada 9 - Realocação do poço produtor PO - 013	239,03	38,00
Rodada 10 - Realocação do poço produtor PO - 006	240,55	38,13
Rodada 11 - Realocação do poço injetor PI - 016	240,62	38,12
Modelo Otimizado	240,62	38,12
Incremento [%]	5,55	

Modelo Representativo 12.	
Número de rodadas positivas	11
Número de rodadas negativas	13
Número total de rodadas	24

Curvas de permeabilidade relativa

Óleo – Água



Tabelas PVT

Tabela do nível PVT₁

Pressão	Propriedades do óleo				Propriedades do gás	
	Razão de Solubilidade	Fator Volume de Formação do óleo	Viscosidade do óleo	Compressibilidade	Fator Volume de Formação do gás	Viscosidade do gás
[kgf/cm ²]	[m ³ std/m ³ std]	[m ³ res/m ³ std]	[cp]	[kgf/cm ²] ⁻¹	[m ³ res/m ³ std]	[cp]
35,5	31,8	1,198	2,054	1,62E-04	0,0346	0,0109
41,8	34,7	1,210	1,987	1,62E-04	0,0291	0,0113
49,2	38,0	1,210	1,913	1,62E-04	0,0245	0,0117
59,8	42,8	1,230	1,810	1,62E-04	0,0199	0,0123
68,5	46,9	1,240	1,730	1,62E-04	0,0172	0,0128
80,9	52,5	1,250	1,623	1,62E-04	0,0144	0,0134
93,9	58,5	1,270	1,518	1,62E-04	0,0123	0,0142
105,8	64,1	1,280	1,430	1,62E-04	0,0108	0,0148
122,0	71,6	1,300	1,321	1,62E-04	0,0093	0,0157
133,9	77,2	1,320	1,250	1,62E-04	0,0084	0,0164
148,0	83,8	1,330	1,174	1,62E-04	0,0076	0,0172
166,3	92,5	1,350	1,091	1,62E-04	0,0067	0,0182
193,4	105,4	1,390	1,000	1,62E-04	0,0058	0,0197
213,3	115,0	1,410	0,955	1,62E-04	0,0053	0,0208
219,4	117,6	1,420	0,940	1,62E-04	0,0051	0,0211
229,5	122,2	1,430	0,910	1,62E-04	0,0049	0,0217
248,0	130,8	1,450	0,854	1,62E-04	0,0045	0,0227
283,0	147,2	1,500	0,749	1,62E-04	0,0040	0,0246
316,9	163,1	1,540	0,647	1,62E-04	0,0035	0,0265
352,6	179,8	1,580	0,539	1,62E-04	0,0032	0,0285
360,0	183,2	1,590	0,517	1,62E-04	0,0031	0,0289

Tabela do nível PVT₀

Pressão	Propriedades do óleo				Propriedades do gás	
	Razão de Solubilidade	Fator Volume de Formação do óleo	Viscosidade do óleo	Compressibilidade	Fator Volume de Formação do gás	Viscosidade do gás
[kgf/cm ²]	[m ³ std/m ³ std]	[m ³ res/m ³ std]	[cp]	[kgf/cm ²] ⁻¹	[m ³ res/m ³ std]	[cp]
0,0	12,6	1,149	2,581	1,40E-04	0,0700	0,0109
35,9	32,8	1,199	2,045	1,40E-04	0,0336	0,0112
45,7	38,2	1,211	1,920	1,40E-04	0,0261	0,0118
53,0	42,1	1,220	1,829	1,40E-04	0,0223	0,0125
68,1	50,1	1,238	1,675	1,40E-04	0,0171	0,0136
80,6	60,6	1,262	1,554	1,40E-04	0,0129	0,0146
112,5	72,3	1,291	1,341	1,40E-04	0,0100	0,0153
131,8	81,3	1,314	1,235	1,40E-04	0,0085	0,0163
145,2	87,3	1,330	1,163	1,40E-04	0,0077	0,0171
162,8	94,9	1,351	1,094	1,40E-04	0,0069	0,0178
190,1	106,0	1,384	1,001	1,40E-04	0,0060	0,0188
211,4	113,5	1,408	0,938	1,40E-04	0,0054	0,0200
212,4	118,2	1,410	0,896	1,40E-04	0,0053	0,0212
231,6	127,3	1,433	0,808	1,40E-04	0,0049	0,0222
249,8	136,0	1,455	0,724	1,40E-04	0,0045	0,0231
250,1	136,1	1,455	0,723	1,40E-04	0,0045	0,0231
265,5	143,5	1,474	0,652	1,40E-04	0,0042	0,0239
274,7	147,9	1,485	0,609	1,40E-04	0,0041	0,0243
282,6	151,6	1,499	0,573	1,40E-04	0,0040	0,0247
292,7	156,5	1,507	0,527	1,40E-04	0,0038	0,0252
305,6	162,6	1,522	0,467	1,40E-04	0,0037	0,0259
318,0	168,5	1,537	0,410	1,40E-04	0,0035	0,0265
347,6	182,6	1,572	0,274	1,40E-04	0,0032	0,0280
360,5	188,8	1,588	0,215	1,40E-04	0,0031	0,0286

Tabela do nível PVT₂

Pressão	Razão de Solubilidade	Fator Volume de Formação do óleo	Viscosidade do óleo	Compressibilidade	Fator Volume de Formação do gás	Viscosidade do gás
[kgf/cm ²]	[m ³ std/m ³ std]	[m ³ res/m ³ std]	[cp]	[kgf/cm ²] ⁻¹	[m ³ res/m ³ std]	[cp]
16,0	20,3	1,134	2,380	1,56E-04	0,0753	0,0119
36,2	32,2	1,161	1,950	1,56E-04	0,0321	0,0126
61,0	46,5	1,206	1,670	1,56E-04	0,0185	0,0141
71,4	50,0	1,207	1,600	1,56E-04	0,0154	0,0144
106,5	67,9	1,254	1,320	1,56E-04	0,0101	0,0161
141,7	85,7	1,300	1,320	1,56E-04	0,0075	0,0179
176,8	103,6	1,347	1,320	1,56E-04	0,0060	0,0196
194,4	112,5	1,370	1,310	1,56E-04	0,0055	0,0205
213,3	122,0	1,395	1,300	1,56E-04	0,0050	0,0215
226,1	128,6	1,412	1,290	1,56E-04	0,0047	0,0221
229,6	130,4	1,417	1,290	1,56E-04	0,0046	0,0223
247,2	139,3	1,440	1,270	1,56E-04	0,0043	0,0232
251,1	141,3	1,445	1,270	1,56E-04	0,0042	0,0234
282,3	157,1	1,487	1,250	1,56E-04	0,0037	0,0249
301,1	166,7	1,511	1,240	1,56E-04	0,0035	0,0259
317,5	175,0	1,533	1,220	1,56E-04	0,0033	0,0267
324,4	178,5	1,542	1,220	1,56E-04	0,0032	0,0270
351,1	192,0	1,578	1,200	1,56E-04	0,0030	0,0284
360,0	196,6	1,589	1,190	1,56E-04	0,0029	0,0288