

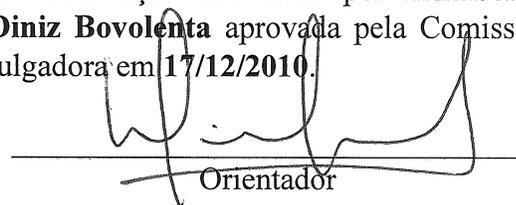
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

HUMBERTO DINIZ BOVOLENTA

# Valor da Informação Incorporando Flexibilidade Operacional

CAMPINAS  
2010

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação defendida por **Humberto Diniz Bovolenta** aprovada pela Comissão julgadora em **17/12/2010**.



Orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

# **Valor da Informação Incorporando Flexibilidade Operacional**

Autor: **Humberto Diniz Bovolenta**

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

Curso: **Ciências e Engenharia de Petróleo**

Área de Concentração: **Reservatórios e Gestão**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à Comissão de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2010  
SP – Brasil.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B669v Bovolenta, Humberto Diniz  
Valor da informação incorporando flexibilidade  
operacional / Humberto Diniz Bovolenta. --Campinas,  
SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Denis José Schiozer.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e  
Instituto de Geociências.

1. Informação. 2. Avaliação de riscos. 3. Riscos. 4.  
Engenharia de petróleo. I. Schiozer, Denis José. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências. III.  
Título.

Título em Inglês: Value of information incorporating operational flexibility

Palavras-chave em Inglês: Information, Risk assessment, Risks, Petroleum  
engineering

Área de concentração: Reservatórios e Gestão

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora: Osvaldo Vidal Trevisan, Ana Paula de Araújo Costa

Data da defesa: 17/12/2010

Programa de Pós Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

## Valor da Informação Incorporando Flexibilidade Operacional

**Autor:** Humberto Diniz Bovolenta

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

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



---

Prof. Dr. Denis José Schiozer, Presidente  
DEP/FEM/UNICAMP



---

Prof. Dr. Osvair Vidal Trevisan  
DEP/FEM/UNICAMP



---

Dr.ª Ana Paula de Araújo Costa  
PETROBRAS/UN-RNCE/ENGP/CER

Campinas, 17 de dezembro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação aos meus pais, Modesto e Enedina, que fizeram inúmeros esforços e sacrifícios para que este momento em minha vida fosse alcançado.

## AGRADECIMENTOS

Apresento a minha gratidão primeiramente aos meus pais, Modesto e Enedina, e as minhas irmãs, Sandra e Denise, pelas inúmeras demonstrações de confiança, amor e respeito, sobretudo nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Denis José Schiozer pela competência, profissionalismo, paciência e orientação nesses anos de mestrado.

Aos amigos de longa data: João Paulo Papa, Rodrigo Pisani, Anderson L. B. de Oliveira, Daniel Ruiz, André Mueller, Vinícius Antunes, Lucas H. Gioso e família, em especial à Dona Clarisse Gioso pelos sábios e valorosos conselhos.

Aos companheiros de república: Consta Grecco, Fernando Xavier, Carlos Godói, André Araújo, Paulo Queiroz e Khaled Barake pelo convívio e amizade ao longo da vida universitária.

Agradeço a Beth Viana pelo incentivo, apoio e amizade incondicional.

À Fernando Perin pelo auxílio na programação dos algoritmos usados na dissertação.

Aos pesquisadores e funcionários do UNISIM pelo suporte e colaboração prestados.

À Alice Obata pelo suporte bibliográfico e pelas agradáveis conversas ao longo do mestrado.

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

À Michelle, Sônia, Fátima, Délcio, Leandro, professores, alunos e demais funcionários do DEP pela ajuda direta ou indireta na realização deste trabalho.

Aos amigos que me proporcionaram um ambiente agradável e grandes momentos durante o mestrado: Gaúcho, Fifi, Ortelan, Carol Badin, Paulinho, Ju Diniz, Odair, Pocotó, Bertolini, Carlão Barreto, Desirée, Fabíola, Avansi, Philipe, Marcus, David, Naga, Manuel, Duda, Marcos C., Márcio, Parker, Zé Nayro, Pedro Nogueira, Ivan Noville, João Bosco, Mauro Ida e demais com quem convivi.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CEPETRO (Centro de Estudos de Petróleo) pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

***“O mal triunfa quando os homens de bem se omitem.”***

Edmund Burke

## RESUMO

BOVOLENTA, Humberto Diniz. *Valor da Informação Incorporando Flexibilidade Operacional*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 124 p. Dissertação de Mestrado.

No início do desenvolvimento do campo, muitas dúvidas sobre o modelo estrutural do reservatório ainda persistem, sendo necessária a mitigação desta e do risco antes da proposição do plano final de desenvolvimento do campo. A mitigação das incertezas e riscos pode ser feita de duas maneiras: através de informações adicionais e flexibilidade operacional, porém ambas possuem limitações. As informações possuem valor dentro de um projeto até o ponto onde as vantagens obtidas pelas informações ao projeto não compensam o seu custo de aquisição. A flexibilidade pode ser impraticável pela impossibilidade de alterações práticas nas estratégias ou nas facilidades, quando essas já estão em operação. O valor da informação (VDI) e flexibilização (VDF) são recursos capazes de quantificar a relevância das informações e flexibilizações para reduzir o risco do projeto, como demonstrado pela metodologia proposta por Xavier (2004). No entanto, essa metodologia considera estratégias fixas de produção e um elevado número de poços secos nos casos sem informação, que impactam sensivelmente o valor da informação, superestimando-o. Desta forma, o objetivo deste trabalho é aprimorar a metodologia de quantificação do VDI, com a implementação de um processo automatizado assistido de seleção e otimização de estratégia, incorporando flexibilidade operacional ao projeto, através da redução do número de poços secos e dimensionamento mais preciso de estratégias de produção e facilidades. A metodologia é aplicada em dois casos: o primeiro caso onde o único atributo incerto é o modelo estrutural, voltado para validar a metodologia automatizada de otimização e seleção da estratégia de produção; o segundo exemplo possui quatro atributos incertos e a metodologia foi aplicada de forma completa. Os resultados indicam que na fase inicial do desenvolvimento, o dimensionamento mais apurado das estratégias e facilidades de produção possui impacto direto

no valor monetário esperado do projeto, que se reflete no VDI e na análise de risco, o que aumenta a precisão e valor destas ferramentas em projetos com alto grau de incertezas associadas.

*Palavras-Chave*

Valor da Informação, Flexibilidade Operacional, Avaliação e Desenvolvimento, Análise de Risco, Estratégia de Produção, Incertezas Geológicas.

## ABSTRACT

BOVOLENTA, Humberto Diniz. *Value of Information Incorporating Operational Flexibility*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 124 p. Dissertação de Mestrado.

At the beginning of field development, many questions regarding the reservoir structural model still remain and it is necessary to mitigate this uncertainty and associated risk before the final field development plan proposition. Mitigation of risks and uncertainties can be done in two ways: through additional information acquisition and operational flexibility, but both have limitations. Information has value within a project up to the point where the benefits obtained do not outweigh its acquisition cost. Flexibility may be not viable due to the impossibility of practical changes in the production strategies or in the facilities when these are already in operation. The value of information (VOI) and value of flexibility (VOF) are resources capable of quantifying the relevance of information and flexibilities in reducing project risk, as demonstrated by the methodology proposed by Xavier (2004). However, this methodology considers fixed production strategies and a high number of dry wells, which significantly impact the value of information, overestimating it. Thus, the objective of this project is to improve this methodology through the implementation of an assisted automated process for strategy selection and optimization, incorporating operational flexibility to the project by reducing the number of dry wells and through a more accurate dimensioning of the production strategies and facilities. The methodology is applied to two cases: the first, where the only uncertain attribute is the structural model, aimed the validation of the automated methodology; the second case has four uncertain attributes and the methodology was applied in a more complete way. The results indicate that, in the initial phase of development, the more accurate design of the production strategies and facilities has a direct impact on the expected monetary value of the project, which is reflected in the VOI and in the risk analysis, increasing the accuracy and the value of these tools in projects with a high degree of associated uncertainty.

*Key Words*

Value of Information, Operational Flexibility, Appraisal and Development, Risk Analysis, Production Strategy, Geological Uncertainties.

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	v
AGRADECIMENTOS.....	vii
RESUMO .....	xi
ABSTRACT.....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xix
LISTA DE TABELAS .....	xxiii
LISTA DE NOMENCLATURAS .....	xxv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	3
1.2 Objetivos .....	6
1.3 Organização da Dissertação .....	6
2. CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	9
2.1 Valor Presente Líquido (VPL) .....	9
2.2 Análise de Risco e Incertezas.....	11
2.3 Valor Monetário Esperado (VME).....	14
2.4 Árvore de Decisão.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Valor da Informação (VDI).....	21
3.2 Estratégia de Produção .....	34
4. METODOLOGIA.....	41

4.1	Metodologia Geral da Dissertação .....	41
4.2	Metodologia de Quantificação do VDI com Flexibilidade Operacional.....	42
4.3	Seleção da Estratégia de Produção Determinística ( $VME_{CI}$ ).....	44
4.3.1	Preparação dos arquivos de entrada do simulador de fluxo .....	44
4.3.2	Definição dos parâmetros operacionais e econômicos.....	45
4.3.3	Preenchimento completo da malha de simulação com poços .....	45
4.3.4	Aplicação do algoritmo de otimização.....	46
4.3.5	Reaplicação do algoritmo de otimização.....	50
4.3.6	Seleção da Estratégia que Maximiza o VPL do Campo.....	51
4.4	Seleção da Estratégia de Produção Probabilística ( $VME_{SI}$ ).....	51
4.5	Cálculo do VDI .....	53
5.	APLICAÇÃO .....	55
5.1	Descrição do Modelo .....	56
5.1.1	Exemplo I .....	57
5.1.2	Exemplo II.....	57
5.2	Ajuste do Número de Poços Secos nos Modelos Incertos .....	58
5.3	Atributos Incertos.....	58
5.4	Parâmetros Operacionais.....	59
5.5	Parâmetros Econômicos .....	59
5.6	Tipo de Informação Utilizada no Trabalho .....	61
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
6.1	Exemplo I.....	63
6.1.1	Seleção das Estratégias de Produção Determinísticas.....	64
6.1.2	Seleção da Estratégia Probabilística de Produção .....	71

6.1.3	Cálculo do VDI .....	73
6.2	Exemplo II.....	75
6.2.1	Cálculo do VDI – Dois Atributos Passíveis de Redução de Incerteza .....	75
6.2.2	Cálculo do VDI – Um Atributo Passível de Redução de Incerteza.....	104
6.2.3	Cálculo do VDI – Quatro Atributos Passíveis de Redução de Incerteza ...	105
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	109
7.1	Conclusões .....	109
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
	ANEXO I .....	119
	Inserção de Palavras-chave no Arquivo de Simulação (*.dat).....	119
	ANEXO II.....	123
	Dados de Entrada do Algoritmo.....	123

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Modelo estrutural do reservatório e a estratégia ótima de produção para os cenários incertos. ....	4
<b>Figura 2.1.</b> Fluxo de caixa de um projeto (Ravagnani, 2008). ....	10
<b>Figura 2.2.</b> Curva de risco para a função-objetivo VPL e seus percentis $P_{10}$ , $P_{50}$ , $P_{90}$ (modificado de Xavier, 2004). ....	13
<b>Figura 2.3.</b> Curva de distribuição de probabilidade da função-objetivo VPL (Xavier, 2004). ....	15
<b>Figura 2.4.</b> Árvore de decisão típica para duas atividades exploratórias (Mian, 2002). ....	17
<b>Figura 2.5.</b> Ilustração do cálculo da árvore de decisão (Mian, 2002). ....	18
<b>Figura 2.6.</b> Exemplo de transformação da árvore de derivação em árvore de decisão. ....	20
<b>Figura 3.1.</b> Fluxograma das etapas de cálculo do VDI (Xavier, 2004). ....	27
<b>Figura 3.2.</b> Modelo de reservatório utilizado como exemplo por Xavier (2004). ....	32
<b>Figura 3.3.</b> Etapas do processo de seleção e otimização de estratégia de produção (Mezzomo, 2005). ....	37
<b>Figura 4.1.</b> Fluxograma geral da metodologia aplicada na dissertação. ....	42
<b>Figura 4.2.</b> Fluxograma do procedimento de cálculo do VDI com flexibilidade em número de poços. ....	43
<b>Figura 4.3.</b> Fluxograma do processo de otimização da estratégia de produção. ....	47
<b>Figura 4.4.</b> Poços testados em uma retirada feita pelo algoritmo. ....	50
<b>Figura 5.1.</b> Mapa de porosidade para o modelo utilizado na metodologia. ....	56
<b>Figura 5.2.</b> Mapa de permeabilidade horizontal dos modelos estruturais pessimista, provável e otimista, respectivamente - Exemplo I. ....	57
<b>Figura 5.3.</b> Modelo de reservatório com incertezas – Exemplo II. ....	57

<b>Figura 5.4.</b> Custo da plataforma em função da capacidade de produção de líquido. ....	60
<b>Figura 6.1.</b> Modelos estruturais pessimista, provável e otimista e suas estratégias iniciais com 29, 70 e 104 poços, respectivamente. ....	64
<b>Figura 6.2.</b> Acima, a evolução do IEC com a retirada de poços na opção 0.0.5 para o caso pessimista, onde os poços são abertos simultaneamente. Abaixo, a configuração 2.1.2 que maximizou o VPL do campo. ....	66
<b>Figura 6.3.</b> Acima, a evolução do IEC com a retirada de poços na opção 0.0.5 para o caso provável, onde os poços são abertos simultaneamente. Abaixo, a configuração 2.1.1 que maximizou o VPL do campo. ....	68
<b>Figura 6.4.</b> Acima, o gráfico mostra a evolução do IEC com a retirada de poços na opção 0.0.5 para o caso otimista, onde os poços são abertos simultaneamente. Abaixo, a configuração 2.1.2 que maximizou o VPL do campo. ....	70
<b>Figura 6.5.</b> Árvore de decisão para um atributo incerto: o modelo estrutural. ....	73
<b>Figura 6.6.</b> Curva de risco do projeto (Exemplo I). ....	74
<b>Figura 6.7.</b> Estratégia que maximiza o VPL do caso base (mapa de transmissibilidade). ....	77
<b>Figura 6.8.</b> Curvas de produção para o caso base – opção 0.0.5. ....	78
<b>Figura 6.9.</b> Curvas de produção para o caso base otimizado – opção 2.1.3. ....	78
<b>Figura 6.10.</b> Análise de sensibilidade para a função-objetivo VPL (20 anos). ....	79
<b>Figura 6.11.</b> Análise de sensibilidade para a função-objetivo $N_p$ (20 anos). ....	80
<b>Figura 6.12.</b> Análise de sensibilidade para a função-objetivo $W_p$ (20 anos). ....	80
<b>Figura 6.13.</b> Curva de risco do projeto. ....	81
<b>Figura 6.14.</b> Árvore de derivação. ....	82
<b>Figura 6.15.</b> Árvore de decisão subdividida em 9 grupos. ....	84
<b>Figura 6.16.</b> Modelos representativos em função de VPL e $N_p$ . ....	85
<b>Figura 6.17.</b> Modelos representativos em função de VPL e $FR_O$ . ....	85
<b>Figura 6.18.</b> Modelos representativos em função de VPL e $W_p$ . ....	86

<b>Figura 6.19.</b> Modelos representativos em função de $FR_O$ e $N_P$ .	87
<b>Figura 6.20.</b> Modelos representativos em função de $FR_O$ e $W_P$ .	87
<b>Figura 6.21.</b> Modelos representativos em função de $W_P$ e $N_P$ .	88
<b>Figura 6.22.</b> Curva de risco e os nove modelos representativos selecionados.	88
<b>Figura 6.23.</b> Otimização da estratégia para o MR0120.	90
<b>Figura 6.24.</b> Otimização da estratégia para o MR0220.	91
<b>Figura 6.25.</b> Otimização da estratégia para o MR1110.	92
<b>Figura 6.26.</b> Otimização da estratégia para o MR 1012.	93
<b>Figura 6.27.</b> Otimização da estratégia para o MR1212.	94
<b>Figura 6.28.</b> Otimização da estratégia para o MR2122.	95
<b>Figura 6.29.</b> Otimização da estratégia para o MR2001.	96
<b>Figura 6.30.</b> Otimização da estratégia para o MR2212.	97
<b>Figura 6.31.</b> Número de poços dos modelos representativos após a otimização.	98
<b>Figura 6.32.</b> Curva de risco dos modelos no caso sem informação.	103
<b>Figura 6.33.</b> Curva de risco para o caso com informação (incluindo o custo da informação).	104
<b>Figura 6.34.</b> Árvore de decisão subdividida em 3 grupos.	106
<b>Figura 6.35.</b> Árvore de decisão subdividida em 81 grupos.	107

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1.</b> Configurações de cronograma de perfuração de poços. ....	48
<b>Tabela 4.2.</b> Configurações de cronograma de abertura dos poços segundo o desempenho. ....	48
<b>Tabela 5.1.</b> Quantidade de poços secos a serem acrescentados nos modelos incertos. ....	58
<b>Tabela 5.2.</b> Atributos incertos e suas probabilidades de ocorrência. ....	58
<b>Tabela 5.3.</b> Parâmetros utilizados na análise econômica dos modelos. ....	60
<b>Tabela 6.1.</b> Valores obtidos nas simulações para o modelo pessimista. ....	65
<b>Tabela 6.2.</b> Valores obtidos nas simulações para o modelo provável. ....	67
<b>Tabela 6.3.</b> Valores obtidos nas simulações para o modelo otimista. ....	69
<b>Tabela 6.4.</b> Número total de simulações e poços em cada modelo estrutural. ....	71
<b>Tabela 6.5.</b> Estratégias de produção após a permutação entre os modelos estruturais. ....	72
<b>Tabela 6.6.</b> Matriz de dados para o cálculo do VME sem informação. ....	72
<b>Tabela 6.7.</b> Valores obtidos na otimização do caso base. ....	76
<b>Tabela 6.8.</b> Modelos representativos selecionados. ....	89
<b>Tabela 6.9.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR0120. ....	90
<b>Tabela 6.10.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR0220. ....	91
<b>Tabela 6.11.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR1110. ....	92
<b>Tabela 6.12.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR1012. ....	93
<b>Tabela 6.13.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR1212. ....	94
<b>Tabela 6.14.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR2122. ....	95
<b>Tabela 6.15.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR2001. ....	96
<b>Tabela 6.16.</b> Valores obtidos nas simulações para o MR2212. ....	97

<b>Tabela 6.17.</b> VME para cada estratégia nos 81 modelos da árvore de decisão. ....	100
<b>Tabela 6.18.</b> VME para cada grupo da árvore de decisão conforme a estratégia.....	102
<b>Tabela 6.19.</b> VME para árvore de decisão com um atributo passível de redução de incerteza..	105

## LISTA DE NOMENCLATURAS

### Abreviações

areas - modelo estrutural

G - número de grupos da árvore

$n_{EST}$  - número de estratégias otimizadas

N - número total de modelos ou cenários possíveis

$n_G$  - número de modelos ou cenários por grupo

p - probabilidade associada

permi - permeabilidade horizontal

permk - permeabilidade vertical

por - porosidade

### Siglas

3D – Tridimensional

4D – Quadrimensional (Espaço-tempo)

AR – Análise de risco

DSS – *Decision Support System*

E&P – Exploração e produção na indústria do petróleo

FR<sub>O</sub> – Fator de recuperação de óleo

FO – Função-objetivo

IEC – Indicador econômico do campo

IEP – Indicador econômico de poços

IEPP – Indicador econômico de poços produtores

IEPI – Indicador econômico de poços injetores

MR – Modelo representativo

$N_p$  – Produção de óleo

NTG – Espessura porosa (*netgross*)

ROI – Retorno sobre investimento

TIR – Taxa interna de retorno

VDF – Valor de flexibilização

VDI – Valor da informação

VME – Valor monetário esperado

$VME_{CI}$  – Valor monetário esperado com informação

$VME_{SI}$  – Valor monetário esperado sem informação

VPL – Valor presente líquido

VOOIS - Volume de óleo originalmente *in situ*

$W_p$  – Produção de água

### **Subscritos**

0 - nível provável (base)

1 - nível otimista

2 - nível pessimista

$j$  - 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  $N_{EST}$

# 1. INTRODUÇÃO

As atividades de exploração e produção (E&P) de petróleo em campos marítimos são consideradas de alto risco por envolver elevados investimentos em cenários complexos com grande quantidade e diversidade de incertezas associadas, que podem influenciar de forma positiva ou negativa no retorno produtivo e financeiro dos campos. As incertezas econômicas, tecnológicas e geológicas se destacam como aquelas que mais impactam os projetos de E&P, especialmente na fase de desenvolvimento dos campos, onde o nível de incertezas é mais baixo que na fase de exploração, entretanto as decisões de investimento são mais críticas.

Independente da fase de execução do projeto, o risco gerado pelas incertezas críticas sempre está presente e, em maior ou menor grau, é inerente à exploração e a produção de petróleo (Hayashi, 2006). Desta forma, é necessário buscar meios de reduzir tanto as incertezas quanto os riscos, com o objetivo de maximizar o retorno financeiro dos projetos. O conhecimento prévio do impacto das incertezas agregadas ao projeto é fundamental, bem como o uso de recursos que possibilite analisar e escolher as melhores opções de investimento, com o objetivo de tornar os processos decisórios menos subjetivos.

As incertezas geológicas são estudadas neste trabalho devido a grande influência no cálculo do volume de hidrocarbonetos *in situ* e no fator de recuperação, principalmente na fase de avaliação e início do desenvolvimento dos campos, quando são determinantes na escolha da estratégia de produção e das facilidades a serem utilizadas durante a vida do campo. Outra característica importante sobre as incertezas relacionadas ao modelo geológico é que muitas delas podem ser mitigadas através de informações adicionais mediante investimento ou flexibilidade operacional (Hayashi, 2006), que possibilita adiar decisões, permitindo modificações na estratégia após eventos futuros. São exemplos de flexibilidade operacional: poços inteligentes, desenvolvimento por módulos e aumento da capacidade de produção.

A aquisição de informações em projetos de E&P inicia-se na fase de exploração, onde diversos métodos diretos e indiretos são utilizados principalmente para localizar e delimitar o reservatório. Neste ponto, as informações coletadas possuem um alto valor por reduzir grande

parte das dúvidas relacionadas ao reservatório e fornecem subsídios para analisar a viabilidade econômica de exploração das jazidas. Assim, a análise de risco na fase exploratória está relacionada principalmente a abandonar ou seguir com os projetos (Demirmen, 1996).

Em campos recém-descobertos, na fase de avaliação ou início da fase de desenvolvimento, com muitas incertezas, é comum não haver uma definição exata do tamanho do reservatório. A indefinição dessas áreas ou extrapolação das características estruturais de uma porção conhecida do reservatório para essas áreas pode resultar em estratégias de exploração equivocadas, gastos desnecessários, grandes prejuízos ou desenvolvimento subótimo, quatro fatores indesejáveis em projetos de E&P de petróleo.

Neste momento do desenvolvimento, a adição de informações é fundamental para reduzir as dúvidas geológicas e estruturais do reservatório remanescentes da fase de exploração. A perfuração de novos poços exploratórios, o uso de perfilagem ou mesmo levantamentos sísmicos 3D são possíveis fontes de informação a serem utilizadas para mitigar a incerteza e o risco, fornecendo informações completas ou incompletas a respeito dos atributos geológicos incertos. Essas informações são utilizadas com o objetivo de melhorar a estratégia de produção e servem como subsídio para a análise de risco; portanto, é possível tirar mais proveito da informação do que na fase exploratória, onde a decisão consiste em abandonar ou não o projeto.

Entretanto, na fase de desenvolvimento, a decisão de reinvestir em novas informações frente aos benefícios que essas possam trazer ao projeto não é trivial, sobretudo pela queda gradual do valor da informação nas fases posteriores à fase de exploração. Com o aumento do número de informações, o seu valor cai até o ponto onde o custo de aquisição torna-se maior que os seus benefícios, não sendo mais vantajoso obtê-las. Assim, é necessária uma forma de quantificar a relevância da sua aquisição, passando pelo cálculo probabilístico do retorno financeiro da informação.

Um critério econômico bastante utilizado em processos decisórios é o cálculo do valor da informação (VDI), que permite estimar o valor máximo a ser pago pela informação, para que os benefícios agregados ao projeto sejam maiores que os custos. Embora seja conceitualmente simples, a quantificação do VDI é complexa e requer algumas simplificações para viabilizar o processo.

Uma metodologia confiável de quantificação de VDI na fase de desenvolvimento do campo foi proposta por Xavier (2004), através de métodos probabilísticos de análise de atributos incertos para quantificação do risco nesses investimentos, através da análise do valor monetário esperado (VME), uso da árvore de decisão e modelos representativos.

## 1.1 Motivação

Na metodologia supracitada, o autor ressalta que o valor da informação adicional é dependente de três fatores: do grau de incerteza presente na caracterização do reservatório, da representatividade da informação e da opção de flexibilização. Entretanto, é observado não só nesse trabalho, mas em outros da literatura (Begg *et al.*, 2002; Portella *et al.*, 2003) e em softwares comerciais<sup>1</sup>, que a opção de flexibilização é poucas vezes levada em conta na análise de risco por ser considerada baixa ou mesmo inexistente em campos marítimos.

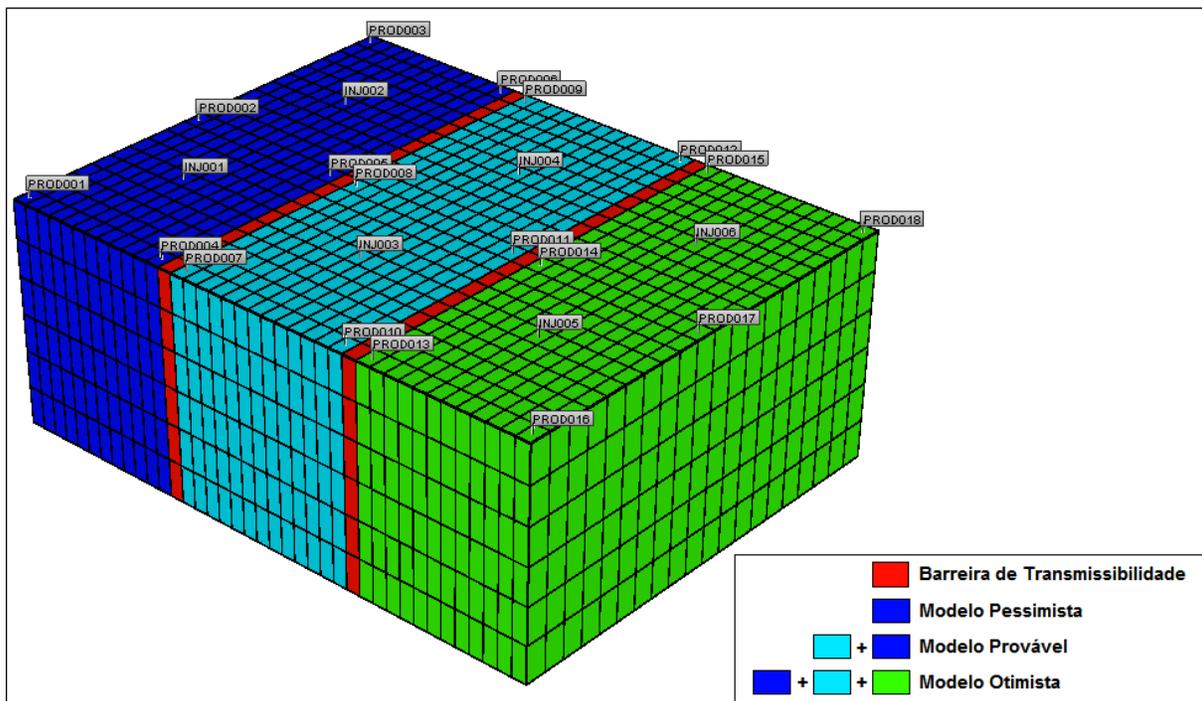
Devido às dificuldades encontradas na alteração das estratégias de recuperação e das facilidades durante o curso de execução do projeto, se estabelece para os diferentes cenários - pessimista, provável e otimista - estratégias fixas e ótimas de exploração, independente do atributo incerto a ser analisado. No entanto, se o modelo estrutural é incerto no início do desenvolvimento, criam-se situações onde o reservatório é parcialmente conhecido através de um poço pioneiro, por exemplo, com grande possibilidade de alterações futuras na estratégia do projeto devido à possibilidade de regiões secas adjacentes. Em situações como essa, onde há muitas incertezas envolvidas, é necessário considerar alguma flexibilidade operacional na análise de risco e principalmente no cálculo do VDI, conforme se pretende mostrar neste trabalho.

O exemplo a seguir ilustra a escolha da estratégia de produção na análise de risco tradicional e a abordagem proposta por este trabalho.

A Figura 1.1 mostra o modelo estrutural do reservatório e as possíveis estratégias de produção para cada cenário incerto. No simulador de fluxo, foi definido para o modelo pessimista uma estratégia otimizada com oito poços, para o modelo provável foi encontrado um número ótimo de 16 poços e para o modelo otimista, 24 poços, dispostos em uma configuração do tipo *five-spot*.

---

<sup>1</sup> Como o Cougar® da Beicip-Franlab e o UNIPAR® desenvolvido pelo Unisim-Unicamp.



**Figura 1.1.** Modelo estrutural do reservatório e a estratégia ótima de produção para os cenários incertos.

Inicia-se o desenvolvimento do campo com as informações disponíveis até o momento. O modelo pessimista conta com: o poço pioneiro, a informação correta sobre o modelo estrutural pessimista, a estratégia otimizada para o modelo e a incerteza nos modelos estruturais adjacentes. O início da perfuração dos poços da estratégia pessimista ocorre sem problemas e há indícios da continuidade do reservatório. Neste caso, a perfuração de um novo poço na região provável pode indicar a existência de petróleo; fato esse que não ocorre. Para manter a modelagem do problema coerente com o problema físico, o correto seria adicionar o custo da perfuração deste poço seco no investimento do campo e optar entre a perfuração de outro poço na região otimista, para eliminar a dúvida, ou não prosseguir com a perfuração de novos poços, já que há grande possibilidade de encontrar outra região seca.

Entretanto, na metodologia tradicional de análise de informação e risco, observa-se que as estratégias otimizadas para os modelos provável e otimista são aplicadas no cálculo de VDI, mesmo se essas regiões forem consideradas secas, o que proporciona um superdimensionamento da estratégia de produção. Desta forma, se a região provável for considerada seca, todos os poços das estratégias provável e otimista alocados nestas regiões são considerados secos e

acrescentados ao investimento, o que influencia de forma moderada ou pouco significativa a análise de risco (por isso, é algumas vezes negligenciado), mas afeta consideravelmente o VDI, segundo o exemplo a seguir.

O valor da informação consiste na diferença entre os valores monetários esperados com (VME<sub>CI</sub>) e sem informação (VME<sub>SI</sub>). Supõe-se inicialmente que o VME<sub>CI</sub> é US\$ 100 milhões e o VME<sub>SI</sub> é de US\$ 80 milhões. O VDI resultante é igual a US\$ 20 milhões. No caso de um pequeno acréscimo de 5% no valor com informação e um decréscimo de 3% no valor sem informação resultam em um VDI igual a US\$ 27 milhões. Assim sendo, essas pequenas variações nos VME resultam em uma diferença final de 35% no VDI, fato que justifica o ajuste o número final de poços para cada cenário incerto.

No entanto, com o ajuste do número de poços nos cenários incertos, é importante destacar a mudança no foco das perdas na quantificação do VDI. Na abordagem tradicional, as perdas no caso sem informação são localizadas no equívoco quanto ao número de poços secos do modelo, o que leva a um superdimensionamento da estratégia de produção. Nesta metodologia, como se propõe a correção do número de poços nos modelos estruturais, as perdas do projeto estão localizadas no sub ou superdimensionamento da plataforma de produção, com impacto direto no investimento do projeto.

Outro fator importante a ser considerado quando há dúvida sobre o tamanho do reservatório no processo de quantificação do VDI é a necessidade de definição da estratégia de produção para um grande número de modelos, o que é inviável na prática, segundo Xavier (2004). A utilização de um processo manual de otimização pode ser inviável pela grande quantidade de estratégias a serem otimizadas, pelo tempo e esforço computacional empregado e pela demanda de simplificações no processo. Logo, um processo automatizado é necessário para diminuir o tempo e esforço computacional, além de obter maior rendimento da informação frente ao processo manual, pois com um maior número de simulações e com um processo de otimização melhor, mais preciso torna-se o valor da informação.

Contudo, apenas o processo automatizado pode levar a situações onde o valor da informação é equivocadamente calculado, pois não incorpora flexibilidade operacional na implantação da estratégia de produção. No caso específico do VDI relacionado com diferentes

modelos estruturais, a incorporação dessa flexibilidade pode ser importante, principalmente a relacionada com o número de poços para cada modelo otimizado.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é aprimorar a metodologia de cálculo do VDI proposta por Xavier (2004), considerando flexibilidade operacional ao processo de tomada de decisão, relacionada com o ajuste do número ótimo de poços em cada cenário, o que não foi feito em publicações anteriores. No entanto, a aplicação de um processo manual de flexibilidade operacional demanda grande tempo e esforço, pela necessidade de seleção e otimização de um elevado número de estratégias, o que leva à necessidade de adequar o processo.

Desta forma, propõe-se como objetivo secundário uma metodologia automatizada e assistida de seleção e otimização de estratégias de produção através de um algoritmo, com o propósito de integrar simulação de fluxo e análise econômica para garantir a qualidade da solução encontrada, pois o cálculo do VDI é bastante dependente do processo de otimização.

## **1.3 Organização da Dissertação**

Este trabalho está dividido em sete capítulos. No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre o tema proposto, apresentando as motivações e objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica e conceitos importantes relativos ao tema proposto, necessários para o entendimento do texto, como valor presente líquido, análise de risco e incertezas, valor monetário esperado e árvore de decisão.

O Capítulo 3 apresenta a revisão de trabalhos da literatura que serviram como referência para a elaboração desta dissertação, destacando-se os temas referentes ao valor da informação e estratégia de produção.

O Capítulo 4 apresenta a elaboração da metodologia proposta por este trabalho e quais os passos que devem ser seguidos para a sua utilização.

O Capítulo 5 detalha os dados utilizados para análise e os modelos de reservatório onde a metodologia do capítulo anterior foi aplicada, com o intuito de validá-la.

No Capítulo 6, são apresentados e detalhados os resultados obtidos após a aplicação da metodologia em dois exemplos, um mais simples para validar a metodologia e o outro que contempla o processo completo de quantificação do valor da informação. A qualidade dos resultados é analisada e uma discussão é feita.

O Capítulo 7 traz as conclusões sobre esta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados alguns conceitos introdutórios para o entendimento das etapas futuras do trabalho, como valor presente líquido, análise de risco e incertezas, valor monetário esperado e árvore de decisão. No entanto, caso o leitor possua familiaridade com esses temas, recomenda-se avançar para o capítulo seguinte.

### 2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

A escolha da infraestrutura de produção de um campo pode ser feita de diversas maneiras, pois muitos fatores são passíveis de mudança dentro de um projeto, como por exemplo, a escolha da plataforma, tipos e quantidades de poços a serem perfurados, forma de exploração dos recursos etc. Isso tem impacto direto nos custos de implantação e no retorno financeiro do campo, resultando em várias alternativas de investimento a serem analisadas. Como essas alternativas são consideradas excludentes, onde a aceitação de uma opção implica na rejeição das demais, é necessário utilizar um critério de escolha do melhor investimento.

Vários indicadores técnico-econômicos podem ser utilizados na análise do investimento (Neves, 2005) como, por exemplo, o retorno sobre investimento (ROI), a taxa interna de retorno (TIR),  $N_p$  atualizado, benefício custo, valor atual equivalente (VAE) etc. Porém, o valor presente líquido (VPL) é o mais importante e aplicado na seleção de projetos, sobretudo em cenários com baixa incidência de incertezas e risco, pois facilita a interpretação dos resultados nos processos de tomada de decisão, indicando o potencial de criação de valor do projeto. Na forma básica, o VPL consiste na conversão dos valores dos fluxos de caixa futuros para uma quantidade equivalente no presente, através de uma taxa de desconto, também chamada de taxa mínima de atratividade (que representa o retorno mínimo esperado pelos financiadores do projeto). Quanto maior essa taxa, menores os fluxos de caixa do projeto, resultando na diminuição do VPL.

A fórmula utilizada para o seu cálculo é dada pela Equação 2.1:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots(2.1)$$

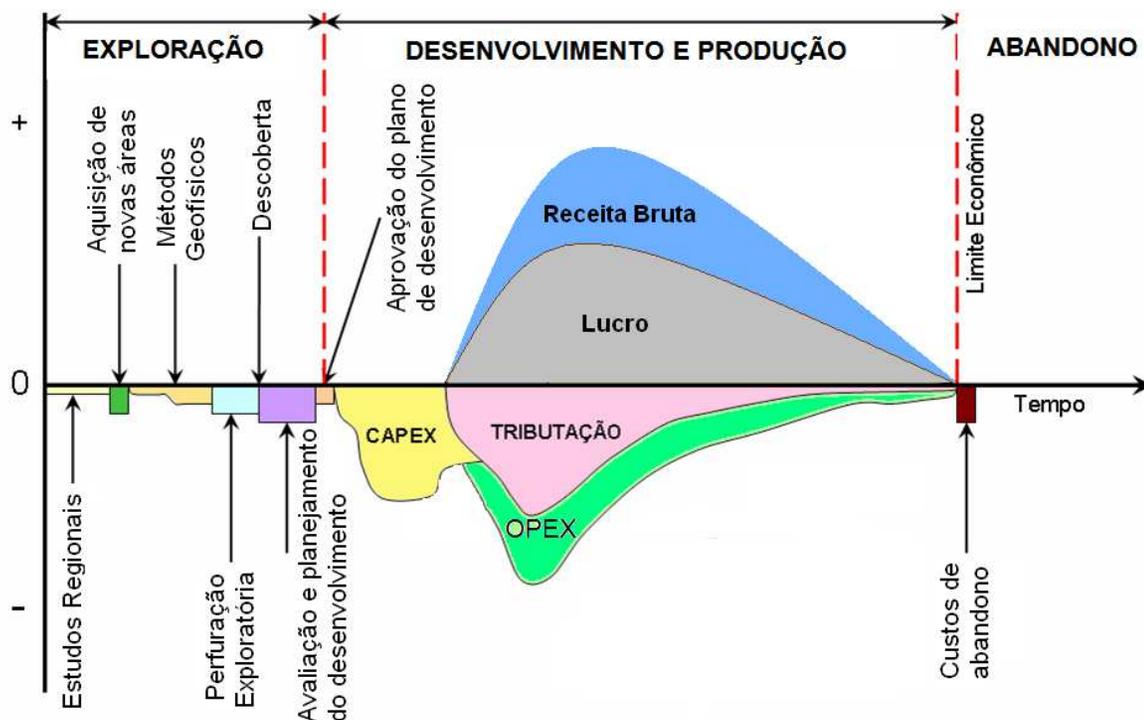
onde: VPL - valor presente líquido;

r - taxa de desconto ou taxa de atratividade;

FC<sub>t</sub> - fluxo de caixa no instante t;

t - período de tempo considerado.

A Figura 2.1 mostra um esquema de fluxo de caixa típico de exploração e produção de petróleo.



**Figura 2.1.** Fluxo de caixa de um projeto (Ravagnani, 2008).

Xavier (2004) ressalta que o 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.

De acordo com Ravagnani *et al.* (2009), o VPL é definido como a diferença entre receitas e custos, ambos atualizados a uma taxa de desconto, a qual é no mínimo, igual ao custo de capital da empresa. Desta forma, de maneira simples, se o VPL for positivo significa que o projeto será lucrativo. Caso contrário, o investidor terá prejuízo, sendo melhor a rejeição do projeto.

Outra forma adotada pelas empresas para garantir a viabilidade de projetos com incertezas é através da estipulação de um preço de robustez, ou seja, um preço conservador do barril de petróleo, que permite a verificação da viabilidade do projeto frente a um preço conservador no longo prazo.

## **2.2 Análise de Risco e Incertezas**

A escolha por um investimento em um cenário sem incertezas é uma tarefa simples, onde a melhor opção é aquela que proporciona maior retorno ao investidor. Apesar desta condição ser a ideal para o investidor, ela não é comum na realidade e o problema ainda é mais complexo em investimentos intensivos de capital. A partir do momento em que o resultado final é passível a incertezas, havendo possibilidade de perdas, é preciso utilizar recursos para guiar o investidor na definição da melhor opção de investimento, levando em consideração as possíveis escolhas, suas probabilidades de ocorrência e seus respectivos resultados, sejam eles lucros ou prejuízos.

A análise de risco (AR) pode ser considerada como um quadro para a tomada de decisões em ambientes de risco e incerteza. A origem histórica e as primeiras noções sobre AR, também chamada de análise de decisão, podem ser parcialmente atribuídas aos estudos probabilísticos e matemáticos de Pascal, Laplace e Bernoulli nos séculos XVII e XVIII (Suslick & Schiozer, 2004). Entretanto, a concepção da teoria aplicada nos dias de hoje foi desenvolvida em 1960 em universidades norte-americanas, a partir das ideias de utilidade (valores relativos dos possíveis resultados de uma decisão), probabilidade e estatística e suas combinações nas noções de valor esperado e da utilidade subjetiva esperada (Evans, 2000).

As aplicações deste conceito são universais e amplamente difundidas em diversos setores de negócios. Em projetos de E&P de petróleo, ferramentas de análise de risco passaram a ser

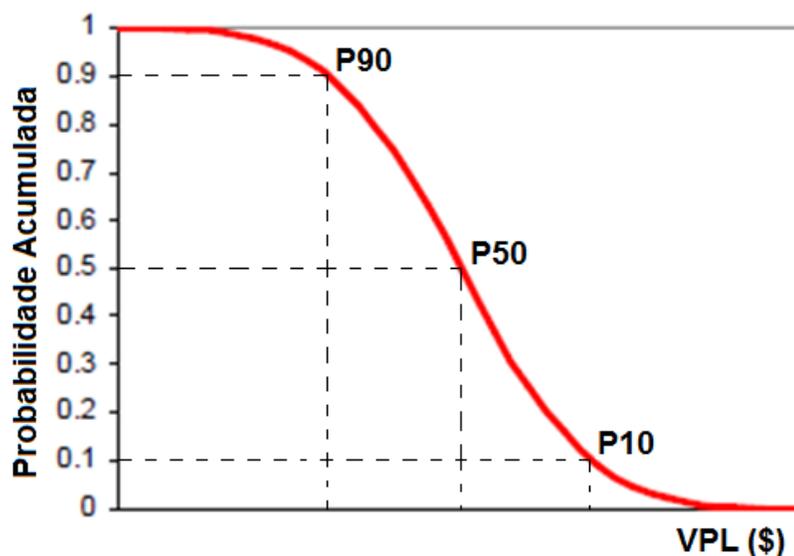
utilizadas já na década de 1960 estimuladas pelas diversas dificuldades nas descobertas de jazidas de hidrocarbonetos (Xavier, 2004). Na década seguinte, a análise de risco passou a ser seriamente aplicada às decisões de exploração (Newendorp & Schuyler, 2000), passando a ser um recurso indispensável na quantificação das incertezas e redução do risco. Segundo os autores, a análise de risco aplicada atualmente pode ser resumida por uma série de passos:

- Definir possíveis resultados que podem ocorrer para cada uma das possíveis decisões, ou alternativas;
- Avaliar lucros ou prejuízos para cada resultado;
- Determinar ou estimar a probabilidade de ocorrência de cada possível resultado;
- Computar o lucro médio ponderado, onde os 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.

Mian (2002) afirma que o propósito da análise de risco é ajudar o tomador de decisão a pensar sistematicamente sobre problemas complexos e melhorar a qualidade das decisões resultantes, minimizando as consequências de se obter um resultado desfavorável. O autor ressalta que, sob condições incertas, uma boa decisão é uma decisão lógica – baseada na aplicação de técnicas quantitativas (estratégias lógicas e consistentes que incorporam os efeitos do risco e das incertezas), combinada com métodos de análise informal (como experiência e julgamento dos profissionais envolvidos no projeto) e as informações coletadas durante o projeto.

A curva de risco é a técnica quantitativa mais empregada pelos gerentes para visualizar as possibilidades de retorno financeiro ou produtivo do projeto. Através da disposição decrescente dos valores da função-objetivo com as probabilidades associadas acumuladas plotados em um gráfico, é possível verificar e avaliar os riscos agregados ao projeto para um determinado período de tempo de produção.

A Figura 2.2 mostra um exemplo da curva de risco, considerando o VPL como função-objetivo. Os percentis de probabilidade de ocorrência  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  e  $P_{90}$ , são os mais utilizados para mostrar o retorno da função-objetivo na presença de incertezas.



**Figura 2.2.** Curva de risco para a função-objetivo VPL e seus percentis  $P_{10}$ ,  $P_{50}$ ,  $P_{90}$  (modificado de Xavier, 2004).

Schuyler (2001) destaca que a análise de risco é utilizada para reduzir a probabilidade e o impacto de certa ameaça e aumentar a probabilidade e o impacto de uma oportunidade.

Incerteza e risco são conceitos próximos, mas distintos na análise de decisão. Essa proximidade pode levar muitas vezes a um emprego equivocado de ambos, como sinônimos, por exemplo, sendo comum nos trabalhos referentes à análise de risco a delimitação destes conceitos.

Silva & Costa (2009) referem-se ao conceito de incerteza como à impossibilidade de se definir o valor exato de uma variável e o risco, no contexto na indústria de E&P de petróleo, está relacionado com o impacto das incertezas associadas a um projeto.

Suslick & Schiozer (2004) consideram que o risco envolve o tamanho do investimento no que diz respeito ao orçamento, o ganho ou a perda potencial e a probabilidade do resultado. Incerteza refere-se à variabilidade dos parâmetros ou atributos, considerando ainda a probabilidade que cada condição pode existir ou ocorrer.

De acordo com Sapatelli *et al.* (2008), enquanto a incerteza está relacionada à variação de parâmetros que afetam uma avaliação, o risco está relacionado com a probabilidade de um cenário adverso ocorrer, um fracasso subsequente e seus custos associados. O autor justifica que a incerteza gera o risco e a oportunidade e, portanto, sem incerteza, não há risco.

Apesar da grande variedade de definições e discussões, o conceito de incerteza utilizado neste trabalho corresponde à falta de informação sobre atributos, sobretudo os geológicos, cujos valores não podem ser obtidos com precisão. As incertezas inerentes aos atributos afetam diretamente a previsão de produção proporcionando dúvidas quanto à recuperação dos hidrocarbonetos, influenciando a estratégia de produção e o retorno financeiro do projeto. A análise das incertezas de produção e do retorno financeiro, associadas com o processo decisório de escolha da estratégia de produção, são fatores importantes para quantificar o risco e gerenciar decisões na fase de desenvolvimento.

As incertezas determinam o risco existente no projeto e precisam ser incorporadas aos modelos de fluxo para se prever as consequências dos vários possíveis eventos, através da avaliação da estratégia e previsão da produção, determinando o rumo das decisões do campo. A simulação numérica de reservatórios propicia a confiabilidade necessária para prever a produção e avaliar a estratégia de recuperação, quando os valores dos atributos incertos são variados, compondo diferentes cenários para avaliação. A partir dos resultados obtidos no simulador é possível aplicar a análise econômica, que possibilita analisar a sensibilidade dos atributos incertos, calcular o VME para cada cenário possível, e mensurar o risco do projeto.

### **2.3 Valor Monetário Esperado (VME)**

Em investimentos considerados sem risco ou ausentes de informação sobre o grau de incerteza e risco associados, o VPL é um indicador suficiente para a medida de valor do investimento. Entretanto, em condições incertas, é preciso reavaliar a seleção dos investimentos, de forma a incorporar as incertezas e considerar o risco na estratégia de decisão do projeto.

O valor esperado é ideal para análise de projetos contendo incertezas, que podem resultar uma grande variedade de opções de investimentos. Esse conceito pode ser definido como o valor da probabilidade ponderada de todos os possíveis eventos (Newendorp & Schuyler, 2000) ou de forma simples, a chance de sucesso vezes o valor do sucesso, menos a chance de fracasso vezes o custo do fracasso (Rose, 2001).

Em termos monetários, o valor esperado de um projeto é o somatório dos valores potenciais de ganhos ou perdas (VPL) dos eventos, multiplicados pelas suas respectivas probabilidades de

ocorrência, sendo comumente chamado de valor monetário esperado (VME), como mostram a Equação 2.2, Equação 2.3 e Figura 2.3. A partir da curva de distribuição de probabilidade da função-objetivo elabora-se a curva de risco do projeto, como mostra a Figura 2.2.

$$VME = \sum_{i=1}^n VPL_i \cdot p_i \dots\dots\dots(2.2)$$

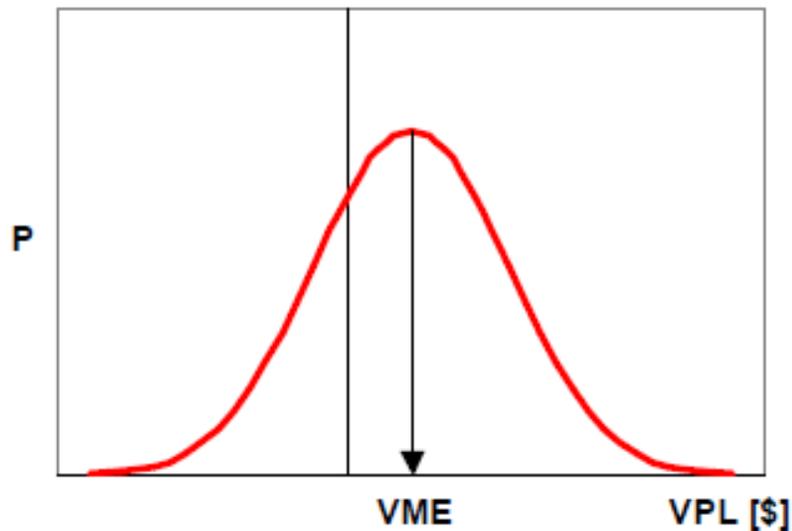
onde : VPL<sub>i</sub> = valor presente líquido do cenário *i*

p<sub>i</sub> = probabilidade de ocorrência do cenário *i*

*n* = número de cenários possíveis

*i* = índice que varia de 1 a *n*; e

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \dots\dots\dots(2.3)$$



**Figura 2.3.** Curva de distribuição de probabilidade da função-objetivo VPL (Xavier, 2004).

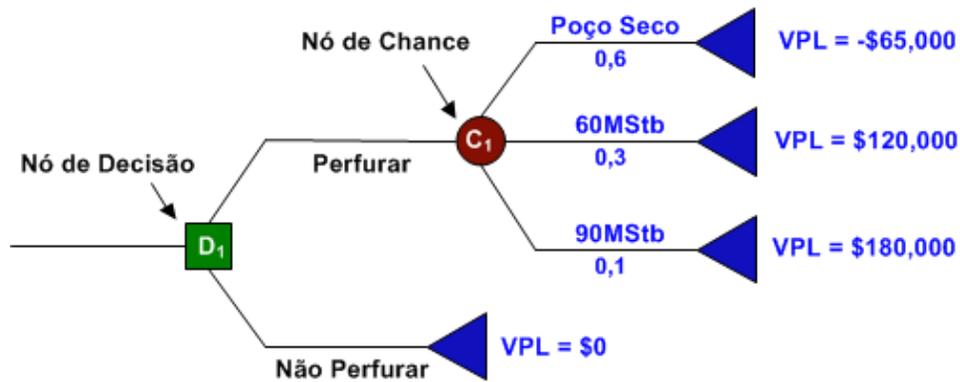
## 2.4 Árvore de Decisão

Os problemas decisórios consistem na análise de um conjunto de possíveis ações a serem seguidas, com suas respectivas probabilidades de ocorrência e resultados. A apresentação do problema pode ser feita em tabelas para casos simples e em árvores de decisão para sequências complexas de decisões, que constitui a maioria dos casos apresentados. Nestes casos, a quantidade de elementos inter-relacionados ao problema torna vaga a percepção do tomador de decisão frente às questões envolvidas no processo decisório, sendo a árvore de decisão extremamente útil na compreensão da estrutura do problema, já que propicia uma representação esquemática e cronológica da situação de decisão.

A aplicação da árvore de decisão possibilita a análise de decisões subsequentes, fornecendo ao gerente do projeto as seguintes vantagens na sua utilização (Mian, 2002):

- Uma visão mais clara da estrutura geral do problema, tornando mais fácil a determinação dos possíveis cenários resultantes quando uma escolha é feita;
- Quebrar um problema de decisão complexo em uma série de pequenas peças. Uma vez que cada parte está resolvida, eles são montados parte por parte para fornecer uma base racional para a decisão inicial;
- Retratar os problemas de uma maneira lógica, simples e facilmente comparáveis;
- Seguir o curso dos eventos durante a implementação da decisão e no caso de alteração das condições, as alternativas restantes podem ser revistas para desenvolver uma nova estratégia;
- Avaliar o tipo de informações necessárias para solucionar um problema;
- Auxiliar na tomada de decisão com o intuito de maximizar o VME;
- Monitorar os resultados alternativos de qualquer decisão, através da comparação dos retornos prováveis dessas alternativas, minimizando os riscos envolvidos.

Um exemplo de análise de decisão é apresentado a seguir (Mian, 2002), com o propósito de conceituar as estruturas que constituem a árvore de decisão e como resolvê-la. Este exemplo ilustra um caso onde há dúvidas da empresa quanto à perfuração de um poço na fase de exploração, conforme a Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Árvore de decisão típica para duas atividades exploratórias (Mian, 2002).

Para respeitar a ordem cronológica dos eventos deve-se iniciar a análise da árvore de decisão da esquerda para a direita. As convenções a seguir são padrões para as árvores de decisão:

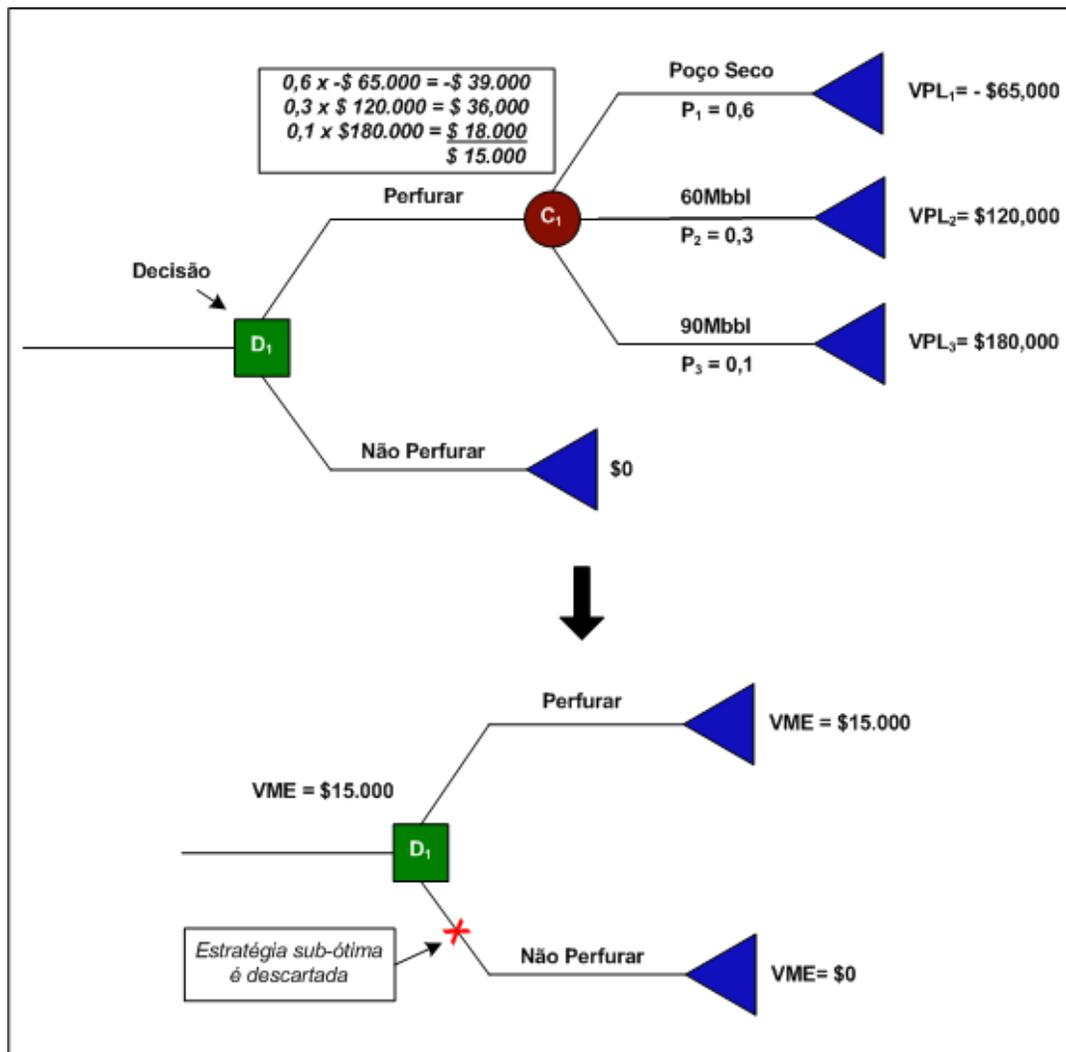
*Nós de decisão:* os pontos onde as decisões devem ser tomadas são representados por quadrados e são chamados de nós de decisão. Neste instante, o gerente tem que ter controle sobre a decisão e escolher uma alternativa ótima dentre as possíveis. No exemplo, a decisão consiste em perfurar ou não um poço, portanto o problema possui apenas um nó de decisão ( $D_1$ ). Um nó de chance pode ser seguido por nós de decisão ou nós de chance. As linhas que saem do quadrado, chamadas de ramos de decisão, correspondem às escolhas disponíveis para o tomador de decisão, não havendo probabilidades ou incertezas associadas a estes.

*Nós de chance:* os círculos representam pontos onde há diferentes resultados em uma árvore de decisão e são chamados de nós de chance ( $C_1$ ). Estes são os pontos no qual não há controle, onde a oportunidade ou a natureza determinam o evento. A probabilidade determina a chance do evento ocorrer. A maior dificuldade da análise de decisão é identificar eventos que possam ocorrer e suas probabilidades associadas. Um nó de chance pode ser seguido por uma série de nós de chance ou por nós de decisão. As linhas que saem do círculo, chamadas de ramos de chances, representam os possíveis resultados de um dado evento. Esses nós de chance mostram como um particular curso de ação pode resultar em um número variado de resultados.

*Probabilidade ou chance:* a possibilidade de acontecer os resultados é representada pelas probabilidades na árvore de decisão. A chance de um resultado particular ocorrer é dada por um valor que varia entre zero (onde não há chance de um resultado ocorrer) a um (resultado certo).

*Ponto ou nó terminal:* o triângulo horizontal determina o resultado financeiro determinístico de uma decisão (VPL), que é baseado nos lucros ou prejuízos e a sua probabilidade de ocorrência. Os resultados provenientes de qualquer decisão são mostrados no lado direito dos nós de chance, também referenciados como ponto terminal, onde não existem mais decisões a serem tomadas ou ocorrências de eventos, como mostrado na Figura 2.4.

A árvore de decisão da Figura 2.5 é interpretada como havendo uma probabilidade de 0,6 do poço perfurado ser seco, resultando em uma perda de \$ 65.000, uma probabilidade de 0,3 de encontrar 60 milhões de barris de óleo, avaliados em \$ 120.000, e, por último, uma probabilidade de 0,1 de encontrar 90 milhões de barris de óleo, avaliados em \$ 180.000.



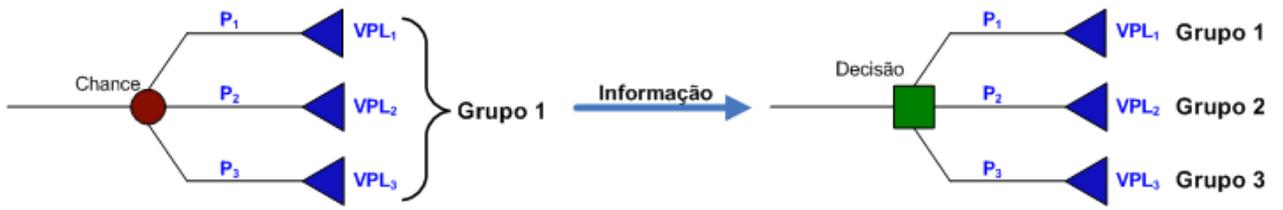
**Figura 2.5.** Ilustração do cálculo da árvore de decisão (Mian, 2002).

O primeiro passo para a solução do exemplo acima é calcular o valor monetário esperado (VME) para o nó de chance ( $C_1$ ), multiplicando o valor presente líquido de cada uma das alternativas dos ramos de chances pela sua respectiva probabilidade de ocorrência e somando-as, segundo a Equação 2.2. Assim, dos três ramos iniciais provenientes do nó de chance passa-se a apenas um, com o valor monetário esperado obtido das três alternativas, como mostra a Figura 2.5. Desta forma, a árvore que antes era composta por nós de decisão ( $D_1$ ) e nós de chance ( $C_1$ ), também chamada de árvore de derivação, passou a ter somente um nó de decisão. Em geral, a preferência de opção deve ser feita no sentido da alternativa que maximiza o valor monetário esperado; neste caso, deve-se optar pela perfuração do poço. Entretanto, a opção pela perfuração do poço tem um risco associado que deve ser levado em conta, por exemplo, 60% de probabilidade de prejuízo.

O exemplo citado acima contempla um caso simples, no qual a árvore de decisão possui poucas ramificações e, em alguns casos, não há necessidade de ser feita. Mas em casos complexos, com uma grande quantidade de ramos e opções de decisão, é necessária a elaboração de uma árvore de decisão com vários ramos.

No processo de quantificação do VDI, com a inclusão de informações adicionais, a árvore de decisão torna-se fundamental para guiar os gerentes na escolha da melhor estratégia de exploração para o projeto, o que será visto adiante. Dependendo do tipo e da quantidade de informações obtidas, a árvore de derivação se altera para uma árvore de decisão, o que modifica a forma de calcular o VDI. Isso ocorre devido ao conceito de grupo aplicado na árvore de decisão, como proposto por Xavier (2004).

Na Figura 2.6, a árvore de derivação à esquerda é constituída por um único grupo e assim, uma única estratégia de produção deve ser adotada para cada nó de chance que possuir. Com a aquisição de informação, cada ramo da árvore de decisão constitui um grupo, sendo que para cada grupo, uma estratégia de produção distinta pode ser considerada. De maneira simplificada, o conjunto de ramos que partem de um nó de chance caracteriza um grupo e para cada ramo que parte de um nó de decisão forma-se um grupo.



**Figura 2.6.** Exemplo de transformação da árvore de derivação em árvore de decisão.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a seguir tem como objetivo mostrar a relevância e aplicação da análise do valor da informação e da estratégia de produção no auxílio das tomadas de decisão e na análise de risco em projetos de E&P de petróleo.

#### 3.1 Valor da Informação (VDI)

Os processos decisórios podem ser mais fundamentados se o risco e as incertezas forem mitigados através do levantamento de informações durante a vida do campo. Sejam informações novas, obtidas na fase exploratória, ou adicionais, adquiridas na fase de avaliação e desenvolvimento, elas podem reduzir ou mesmo eliminar as incertezas, contribuindo para o aumento do valor esperado do campo. Entretanto, o investimento na coleta e análise de informações demanda custo e/ou atraso na implementação do projeto.

Desta forma, antes da decisão de compra de informações, algumas questões devem ser respondidas, como por exemplo, se vale a pena obter informação adicional e qual fonte de informação dentre as potenciais (levantamento sísmico, perfuração de um poço exploratório, perfilagem, testemunho etc.) deve ser utilizada para melhorar o processo decisório (Mian, 2002).

A relevância econômica de se obter novas informações pode ser medida quantitativamente através do conceito de VDI. O valor que essa informação possui é dependente do custo de aquisição e do retorno financeiro obtido após a sua utilização, podendo ser quantificado através da diferença do VME do projeto com e sem informação, conforme a Equação 3.1.

$$VDI = VME_{CI} - VME_{SI} \dots\dots\dots(3.1)$$

Os valores monetários esperados sem informação ( $VME_{SI}$ ) e com informação ( $VME_{CI}$ ) são dados pela Equação 3.2 e Equação 3.3, respectivamente:

$$VME_{SI} = \max_{w=1}^{n_{EST}} \left\{ \sum_{j=1}^N \left[ (VPL_{\text{estrat\u00e9gia}(w), \text{modelo } j}) \cdot P_{\text{modelo } j} \right] \right\} \dots\dots\dots(3.2)$$

onde:  $n_{EST}$  – n\u00famero de estrat\u00e9gias otimizadas;  $w$  – \u00edndice que varia de 1 a  $n_{EST}$  ;  $N$  – n\u00famero total de modelos ou cen\u00e1rios poss\u00edveis;  $j$  – \u00edndice que varia de 1 a  $N$ ;

$$VME_{CI} = \sum_{k=1}^G \left\{ \max_{w=1}^{n_{EST}} \left[ \sum_{\ell=1}^{N_G} (VPL_{\text{estrat\u00e9gia}(w), \text{modelo } \ell}) \cdot P_{\ell} \right] \right\}_{(k)} \dots\dots\dots(3.3)$$

onde:  $n_{EST}$  e  $w$  foram definidos na Equa\u00e7\u00e3o 3.2;  $N_G$  – n\u00famero de modelos ou cen\u00e1rios por grupo;  $\ell$  – \u00edndice que varia de 1 a  $N_G$ ;  $G$  – n\u00famero de grupos da \u00e1rvore;  $k$  – varia de 1 a  $G$ .

A primeira aplica\u00e7\u00e3o do valor da informa\u00e7\u00e3o no contexto anal\u00edtico das decis\u00f5es de neg\u00f3cios foi atribu\u00edda \u00e0 Schlaifer (1959), onde focou primariamente em problemas de infer\u00eancia estat\u00edstica e amostragem, n\u00e3o apenas fornecendo a primeira defini\u00e7\u00e3o te\u00f3rica de VDI, mas discutindo o problema da decis\u00e3o sob uma condi\u00e7\u00e3o de incertezas, em um sentido mais amplo. Entretanto, uma das primeiras no\u00e7\u00f5es sobre valor da informa\u00e7\u00e3o pode ser atribu\u00edda \u00e0 Ramsey (1926), que desenvolveu as bases para a teoria moderna de probabilidade subjetiva, provando que quando o conhecimento ou a informa\u00e7\u00e3o \u00e9 livre, ela se paga pela expectativa de ser adquirida (Bratvold *et al.*, 2007).

Voltado ao contexto da ind\u00fastria do petr\u00f3leo, Grayson Jr. (1960) publica um trabalho pioneiro, no qual apresenta formas de organiza\u00e7\u00e3o e procedimentos para tomadas de decis\u00e3o na explora\u00e7\u00e3o de \u00f3leo e g\u00e1s. O foco de seu trabalho est\u00e1 voltado para decis\u00f5es de perfura\u00e7\u00e3o e detalha como utilizar o conceito de VDI para auxiliar na decis\u00e3o de compra de informa\u00e7\u00f5es.

Um dos primeiros artigos a relacionar o uso de informa\u00e7\u00f5es como meio para melhorar um processo decis\u00f3rio foi apresentado por Warren (1983). Neste trabalho, o autor demonstra o c\u00e1lculo do VDI e destaca o impasse encontrado no in\u00edcio do desenvolvimento do projeto, com rela\u00e7\u00e3o \u00e0 escolha entre iniciar ou rejeitar um projeto de desenvolvimento ou aguardar para tomar uma decis\u00e3o, embasada em informa\u00e7\u00f5es adquiridas e analisadas posteriormente. Segundo o autor, o tempo reduzido ao final da fase de explora\u00e7\u00e3o contribui para o impasse na tomada de decis\u00e3o.

A ascensão da sísmica 3D como potencial fonte de informação levou a estudos sobre a influência desta ferramenta nos processos decisórios e o valor deste tipo de informação, especialmente em campos marginais e economicamente sensíveis. Gaarenstroom (1984) relata a experiência do uso de informações sísmicas no campo de Cormorant, que colaboraram para um entendimento prévio das complexas estruturas e descontinuidades do reservatório, alterando a estratégia inicialmente proposta para o campo. Além disso, o uso conjunto de dados sísmicos 3D e de poços de avaliação na fase de pré-desenvolvimento do campo possibilitaram a redução do número de poços secos, favorecendo uma alocação mais adequada de novos poços e servindo como suporte adicional na definição das plataformas.

Lohrenz (1988) propõe uma metodologia baseada no valor da informação para orientar as tomadas de decisão, através de quatro exemplos, sendo as informações divididas em: favoráveis e não favoráveis. O autor expõe os cuidados que se deve ter com as informações e as suas consequências nas decisões futuras, especialmente quando consideradas perfeitas, pois podem gerar falsas expectativas e tendências de projeções otimistas em cenários onde o desempenho não é tão excepcional quanto se espera. Vale destacar que as projeções pessimistas podem levar a resultados subótimos.

Em sua análise, o preço do óleo possui uma grande influência. Nota-se que, em cenários com preço de óleo baixo, as informações adicionais são mais relevantes e possuem maior valor, pela possibilidade de melhora na caracterização do reservatório ou na estimativa das reservas. Com o aumento do preço do óleo, a viabilidade dos projetos passa a independe das informações disponíveis e o seu valor diminui. Neste cenário, o retorno financeiro esperado é elevado o suficiente para que as companhias apressem as etapas iniciais de análise do campo e antecipem a produção, de forma a acelerar o *payback*. Isso acarreta em não investimento nas informações relacionadas à modelagem do reservatório e suas propriedades petrofísicas, que pode implicar em decisões equivocadas nas fases de avaliação e desenvolvimento.

Gerhardt & Haldorsen (1989) utilizam a metodologia de Lohrenz (1988) para auxiliar a tomada de decisão através de três possíveis fontes de informações, discutindo as vantagens e desvantagens do método proposto. Os autores afirmam também que as informações adicionais devem ser recolhidas somente quando contribuem para melhorar o VPL do projeto e reduzir o risco de investimento da empresa. Segundo os autores, a metodologia empregada é uma

ferramenta simples, que em uma forma muito concentrada, pode ilustrar problemas complexos e enfatizar o efeito de fatores críticos. Entretanto, necessita de um alto grau de simplificação antes da solução de problemas complexos.

Dunn (1992) utiliza informações provenientes de perfilagem para calcular o valor da informação perfeita através de uma técnica numérica, que incorpora alguns conceitos como perda de oportunidade, expectativa de perda e distribuição de probabilidade na discretização da incerteza, segundo o qual, recomenda-se verificar a sensibilidade de cada tipo de distribuição (normal, triangular ou uniforme) no cálculo do valor da informação. A informação, segundo o autor, somente tem valor se a mesma possui capacidade de alterar decisões futuras, de forma a maximizar o lucro ou atenuar uma perda.

De acordo com Demirmen (1996), além de um critério importante para avaliação da subsuperfície, o conceito de valor da informação deve ser utilizado como ferramenta para evitar a sub ou superavaliação do projeto, fatores prejudiciais à lucratividade do projeto já que ambos implicam em perda de recursos. A confiabilidade da informação é importante na fase de avaliação, destaca o autor, que introduz alguns conceitos sobre informação completa, informação parcial completamente confiável e informação parcial não completamente confiável.

O autor ressalta que o desenvolvimento do campo com uma infraestrutura superdimensionada pode diminuir o VPL do projeto, levando a decisões errôneas a respeito das reservas. O projeto que, se bem dimensionado, teria um valor de VPL positivo indicando a continuidade dos investimentos e a rentabilidade futura, acaba sendo tratado como um projeto não comercial, ou seja, com VPL negativo. Pode-se acrescentar ao comentário do autor que a infraestrutura subdimensionada também é prejudicial ao projeto, pois a produção do campo pode ser limitada pela capacidade operacional da infraestrutura, resultando em perdas.

Begg *et al.* (2002) justificam que o baixo desempenho econômico da indústria de E&P de petróleo pode ser atribuído a dois fatores principais: a avaliação imprecisa dos impactos econômicos da incerteza nos projetos e aos escassos investimentos em processos de tomada de decisão. Ambos podem implicar na superestimação dos retornos ou na subestimação dos riscos de perda, fatores prejudiciais em projetos intensivos de capital.

Em sua análise, as informações podem ser utilizadas para minimizar as consequências citadas acima, entretanto, o foco indevido no Valor de Informação (VDI) e em técnicas clássicas de fluxo de caixa descontado pode impedir o valor total de criação de uma oportunidade de investimento, por ignorar o valor potencial que pode ser conseguido através de flexibilidade para gerenciar, ou mesmo, explorar a incerteza. Destacam ainda que há quatro situações onde flexibilidade pode ser empregada:

- Quando adquirir informações para reduzir a incerteza não é possível.
- Quando é mais barato do que adquirir informações.
- Para gerenciar a incerteza residual após a aquisição da informação.
- Quando se cria ou aumenta o valor do projeto.

Desta forma, os autores expandem o conceito de VDI para avaliar o valor da flexibilização (VDF), através de três 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 e o segundo exemplo está relacionado à incerteza do volume de óleo originalmente *in situ* (VOOIS). No terceiro exemplo, utilizam um método chamado *Stochastic Integrated Asset Model* para explorar a incerteza no preço do óleo quando se utiliza a teoria das opções reais.

Nos três exemplos, observa-se que os autores utilizam a flexibilidade apenas como uma oportunidade para criar ou aumentar o valor do projeto e descrever a incerteza, o que acaba se refletindo na análise de risco. A aplicação da informação é feita para definir qual a possível alternativa de investimento a ser seguida, sem proporcionar alterações na estratégia de produção, ou seja, não incorpora a flexibilidade operacional durante a execução do projeto.

Haskett (2003) busca uma forma eficiente de reduzir as incertezas na fase de avaliação através da alocação ótima dos poços e a técnica de valor de informação. Uma das maiores dificuldades está na escolha da localização ideal do próximo poço a ser perfurado a partir de seu predecessor, sobretudo pelo receio da escolha acarretar em um poço seco. O autor justifica que independente do sucesso da perfuração, as informações adquiridas por esse poço são importantes para a redução das incertezas da fase exploratória e a confirmação das reservas provadas, fatores importantes para maximizar a rentabilidade do projeto e gerenciar o risco.

A utilização de árvores de decisão adiciona transparência ao processo decisório, apresentando os cálculos relacionados ao VDI através da diferença entre as árvores com e sem informação. Portella *et al.* (2003) aplicam uma análise experimental do valor da informação sob condições de incerteza para otimizar a exploração em um bloco de águas ultra profundas, localizado na Bacia de Campos. Essa análise combina uma técnica chamada *Decision Support System* (DSS<sup>2</sup>), desenvolvida por Floris & Peersmann (2000), com a metodologia de superfície de resposta. No trabalho, os atributos que mais impactaram a incerteza volumétrica foram: o mapa da área NTG, a posição do contato óleo-água e a permeabilidade absoluta.

Um modelo tridimensional do reservatório foi construído em um simulador de fluxo, considerando dois atributos incertos e três níveis de incerteza, constituindo nove modelos na árvore de decisão. Comparou-se a produção acumulada de óleo proveniente da metodologia de superfície de resposta e da simulação numérica. Uma árvore de decisão foi constituída com a simulação de Monte Carlo, tendo como atributo incerto a permeabilidade. Para a combinação de cada cenário, as curvas de produção vindas da metodologia de superfície de resposta foram inseridas e, para cada iteração de Monte Carlo, o software escolheu ao acaso uma das curvas para calcular o valor presente líquido do projeto.

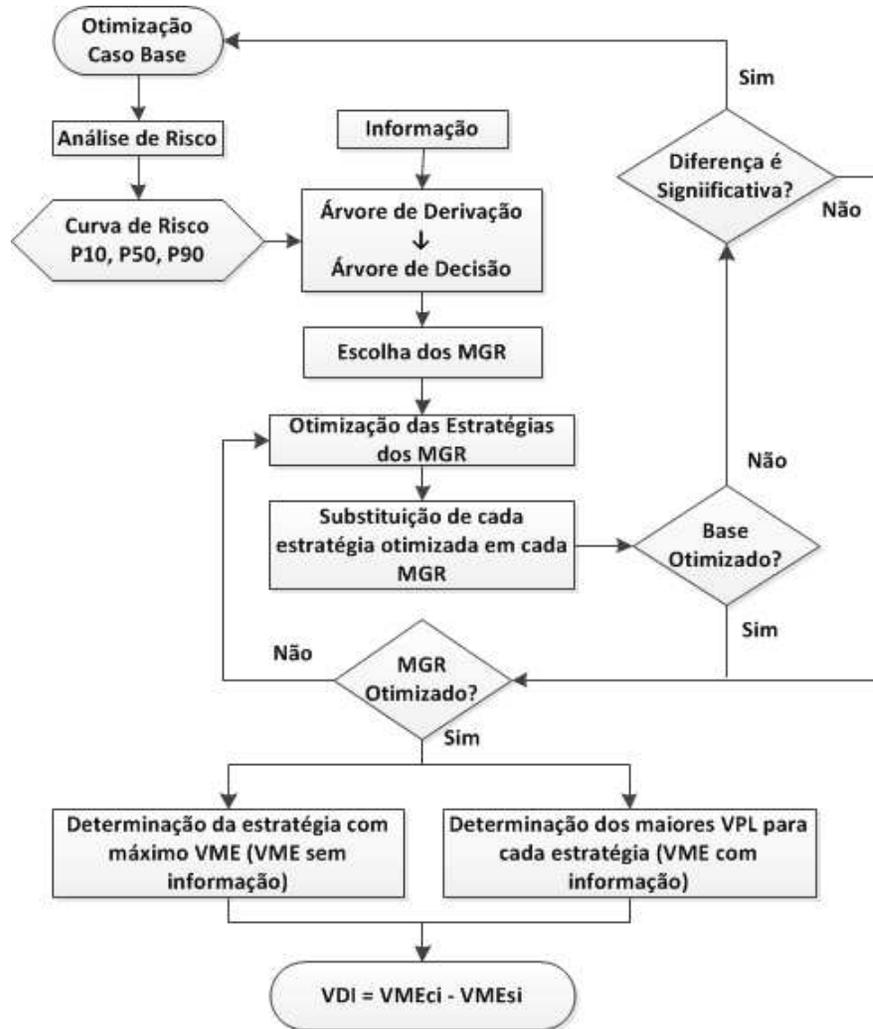
O valor da informação foi calculado pela comparação entre as árvores de decisão com e sem a informação, que resultou em um valor de US\$ 43,94 milhões, maior que o custo de perfuração de um poço. No caso, as informações do poço de avaliação justificaram o investimento, reduzindo as incertezas volumétricas. Desta forma, a dúvida entre iniciar logo o plano de desenvolvimento ou adquirir mais informações ficou resolvida para os autores, ou seja, a antecipação da produção não se mostrou vantajosa frente à aquisição de informações e foi descartada.

No entanto, observa-se que a quantificação de VDI proposta pelos autores tem como objetivo mostrar a relevância da aquisição de informações frente ao custo do poço e a redução do risco de perda de dinheiro com a obtenção de informação no desenvolvimento, não considerando nenhuma flexibilidade futura, o que não é correto em uma análise de VDI, pois qualquer alteração não esperada no curso do projeto pode impactar o resultado obtido e a decisão sobre a estratégia a ser seguida.

---

<sup>2</sup> Essa técnica combina árvore de decisão com simulação de Monte Carlo.

Xavier (2004) desenvolveu uma metodologia confiável de cálculo de VDI nas fases de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo, incorporando as incertezas geológicas na modelagem do reservatório e utilizando simulação numérica de fluxo. A aplicação pode ser feita em modelos simples ou complexos, sem restrições quanto ao número de atributos geológicos incertos, como mostra a Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Fluxograma das etapas de cálculo do VDI (Xavier, 2004).

O tratamento das incertezas foi feito de forma probabilística através do modelo da árvore de derivação, discretizando a variação de cada parâmetro em níveis e realizando a combinação de todos os cenários através da árvore de decisão. Devido à quantidade elevada de atributos incertos e seus níveis de incerteza, o número de simulações cresce exponencialmente, havendo a

necessidade de simplificações, como por exemplo, a análise de sensibilidade para determinar os atributos críticos e o uso de modelos representativos para reduzir a quantidade de modelos a serem otimizados.

A seguir estão detalhados os passos adotados em cada etapa da metodologia de quantificação do VDI (Ligero *et al.*, 2008):

***Etapa 1 - Definição das incertezas:*** selecionar os atributos incertos, definir seus níveis de incerteza e probabilidades de ocorrência associada a cada nível. Inicialmente, consideram-se três níveis de incerteza para cada atributo: pessimista, provável e otimista. A discretização em três níveis é suficiente para uma boa representação inicial dos atributos, entretanto quanto maior a importância do atributo, maior o número de níveis em que o atributo deve ser discretizado. Os atributos caracterizados por distribuições discretas de probabilidades têm seus níveis de incerteza definidos pela qualidade das análises confiáveis e representativas disponíveis.

***Etapa 2 - Elaboração do Caso Base:*** elaboração do modelo geológico constituído por todos os atributos incertos com seus valores mais prováveis. Tal modelo, denominado de caso base, tem a conotação de modelo determinístico. A estratégia de produção deste modelo é selecionada em termos de uma função-objetivo pré-estabelecida, como por exemplo, o VPL. Esta etapa tem como objetivo, portanto, a determinação de um modelo do reservatório com uma estratégia de produção adequada para elaboração da curva de risco.

***Etapa 3 - Análise de Sensibilidade:*** a análise de sensibilidade visa à seleção dos atributos incertos mais críticos de modo a reduzir o número de atributos a serem considerados no processo de quantificação do risco e consequentemente no cálculo do VDI. O procedimento adotado na análise de sensibilidade consiste na variação de um atributo incerto por vez no modelo base. O VPL representa a principal função-objetivo, na qual o efeito dos atributos incertos é analisado, contudo funções tais como, produção acumulada de óleo ( $N_p$ ) e de água ( $W_p$ ) devem ser levadas em consideração, pois atributos com pouco efeito no VPL podem causar variações significativas na produção de óleo ou água. Caso o número de atributos seja pequeno, essa etapa pode ser eliminada do processo.

***Etapa 4 - Elaboração da Árvore de Derivação:*** elaboração da árvore de derivação, na qual cada ramo corresponde a um modelo de simulação completo e distinto. O número de atributos a

serem incluídos na árvore de derivação depende dos objetivos do caso em estudo. O procedimento da adição gradativa de atributos críticos na árvore de derivação (Costa & Schiozer, 2003) garante que apenas os atributos mais importantes constituam a árvore e que uma precisão aceitável seja obtida sem excessivo tempo computacional.

**Etapa 5 - Curva de Risco:** os vários cenários gerados pela combinação dos atributos críticos através da árvore de derivação são submetidos à simulação numérica de fluxo. Os resultados das simulações são empregados no cálculo do VPL de cada um dos modelos. Os VPL obtidos são tratados estatisticamente a fim de elaborar a curva de risco e de quantificar o risco envolvido no projeto. É importante observar que a elaboração da curva de risco não é necessária no cálculo do VDI, porém de acordo com Hayashi (2006), sua importância é fundamental na determinação qualitativa ou quantitativa do risco envolvido no projeto, o que pode também influenciar a decisão de adquirir ou não uma nova informação.

**Etapa 6 - Aquisição da Informação:** verifica-se a possibilidade de redução ou eliminação das incertezas de determinados atributos incertos através da aquisição de novas informações. O investimento em informações adicionais sobre o reservatório pode estar associado a operações, tais como, realização de sísmica 3D e 4D, perfuração de poços de delimitação, execução de testes de pressão e/ou de laboratório e implantação de um plano piloto de produção.

**Etapa 7 - Árvore de Decisão:** a árvore de derivação é transformada em árvore de decisão após a aquisição da informação adicional.

**Etapa 8 - Seleção dos MR:** os modelos representativos (MR) visam representar as incertezas geológicas do reservatório e a variabilidade das estratégias de produção. A seleção dos MR, segundo Xavier (2004) depende dos seguintes pontos:

- do número de atributos e seus respectivos níveis passíveis de redução de incerteza - quanto maior o número desses atributos, maior o número de MR a ser selecionado;
- da dispersão apresentada no gráfico do Valor Presente Líquido *versus* Fator de Recuperação de Óleo - quanto maior a dispersão dos pontos, maiores as possíveis diferenças nas estratégias de produção dos MR;

- das probabilidades de ocorrência de cada modelo – altas probabilidades de ocorrência concentradas em determinados modelos devem ser diluídas em um número maior de modelos;
- da precisão desejada no processo - quanto maior o número de MR, maior a precisão e confiabilidade no cálculo e;
- do tempo disponível para a realização do cálculo do valor da informação. É importante ressaltar que o modelo base deve ser considerado como um MR.

Portanto, os MR são selecionados visando definir diferentes estratégias de produção para cada cenário ou grupo da árvore de decisão, de modo que quanto maior o número de MR selecionados, maior é a garantia de otimização da estratégia de produção para o grupo. O uso de um número limitado de MR é baseado na intenção de diminuir o tempo computacional e do estudo em geral.

***Etapa 9 - Otimização das Estratégias de Produção***: os MR são submetidos ao processo de otimização de suas estratégias de produção. É necessário que as estratégias de produção dos MR e do modelo base estejam otimizadas, caso as mesmas não estejam é necessário otimizá-las. Deste modo, o procedimento de otimização pode ser iterativo.

***Etapa 10 - Cálculo do  $VME_{SI}$*** : o cálculo do valor monetário esperado sem informação é realizado através da Equação 3.2. Todos os modelos da árvore de derivação são simulados considerando cada uma das estratégias de produção otimizadas dos MR a fim de determinar a estratégia que maximiza o VME do caso sem informação. Conseqüentemente, o número de modelos a ser simulado é igual ao número de modelos MR multiplicado pelos ramos da árvore de derivação (número total de cenários).

***Etapa 11 - Cálculo do  $VME_{CI}$*** : o cálculo do valor monetário esperado com informação é obtido pela Equação 3.3, generalizada para  $n$  estratégias. Para os modelos com informação, as estratégias de recuperação devem ser otimizadas para os seus respectivos modelos estruturais, ou seja, o modelo pessimista possui uma estratégia pessimista, o modelo provável possui uma estratégia provável e o modelo otimista possui uma estratégia otimista, não havendo dúvidas quanto aos seus atributos. Desta forma, o ganho com a informação é o máximo.

**Etapa 12 - Cálculo do VDI:** O valor da informação é obtido pela diferença entre o  $VME_{CI}$  e o  $VME_{SI}$ , conforme a Equação 3.1. É importante frisar que, pelo fato do VDI ser uma diferença entre VME, qualquer variação nesses valores pode aumentar ou diminuir significativamente o valor da informação. Desta maneira, é necessária atenção quanto ao cálculo dos VME para evitar a propagação de erros.

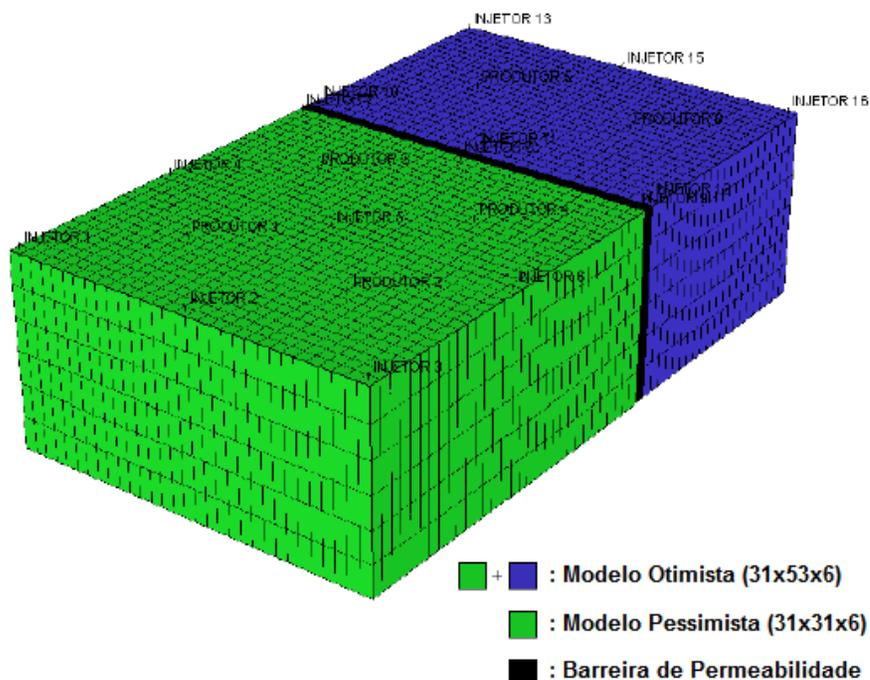
A quantificação do valor da informação na fase de desenvolvimento é um processo complexo devido ao grande número de incertezas e variáveis envolvidas, à necessidade de modelagem precisa do campo e à necessidade de integração com o processo de seleção de escolha de estratégia de produção para os possíveis cenários, ao contrário da fase de exploração cujas metodologias possuem modelagem mais simples. Entretanto, alguns trabalhos aplicados às fases de avaliação e desenvolvimento de campos não detalham suficientemente o procedimento adotado ou simplificam demasiadamente o problema, com possíveis erros na quantificação do VDI (Xavier, 2004).

A maior parte das metodologias disponíveis na literatura utiliza a árvore de decisão apenas como critério para investir ou não no final dos ramos da árvore, ou seja, baseia-se na vantagem que a informação traz ao evitar ramos da árvore com prejuízo, impedindo decisões equivocadas, como, por exemplo, nos trabalhos de Dunn (1992) e Portella *et al.* (2003). Se a informação fosse obtida e um dos ramos resultasse em VPL negativo, a opção sugerida pelos autores seria descartar o investimento no projeto. Entretanto, este critério apenas elimina cenários de VPL negativo do projeto, não tirando proveito do uso da informação para alterar a estratégia de produção e melhorar o gerenciamento do campo em questão, o que subavalia o 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 (Xavier, 2004).

Em metodologias sobre VDI, a aquisição de informações é considerada como a principal ou, talvez, a única ferramenta para a mitigação de riscos no projeto. Entretanto a adição de flexibilidade operacional ao projeto, ou seja, uma possível variação na estratégia entre os cenários possíveis (pessimista, provável e otimista), é um parâmetro importante a ser considerado antes da aquisição da informação. Quando aplicados de maneira conjunta, permitem uma mitigação maior

dos riscos na implantação de um projeto, o que foi mostrado, mas não explorado completamente por Xavier (2004).

Na aplicação de seu primeiro exemplo, o autor possui dúvidas quanto ao modelo estrutural do reservatório, com incertezas em dois níveis: pessimista e otimista, como mostra a Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Modelo de reservatório utilizado como exemplo por Xavier (2004).

Na opção por não obter informação, possuía apenas duas estratégias otimizadas – uma pessimista com 13 poços e outra otimista com 21 poços. Para uma análise mais completa do  $VME_{SI}$  incluiu a opção de uma estratégia média de produção, na qual assumiu que o número de poços deveria estar compreendido entre os valores pessimista e otimista, chegando a uma estratégia intermediária de 16 poços. No entanto, em dois casos de sua árvore de decisão - quando se aplica a estratégia média no modelo pessimista e a estratégia otimista no modelo pessimista – os poços que foram alocados em regiões externas ao reservatório são considerados secos, sendo incorporados aos cálculos econômicos. No caso da estratégia média, três poços são alocados em região seca e no caso da estratégia otimista, oito poços são alocados em região considerada seca, que acaba impactando sensivelmente o VPL e o VME das estratégias.

Esses casos servem para ilustrar a superavaliação do  $VME_{SI}$  quando uma estratégia fixa é inserida nos demais modelos e uma grande quantidade de poços secos é incorporada aos cálculos, o que torna o problema incoerente, pois se um poço for perfurado em uma região externa ao reservatório e ele for considerado seco, não há a necessidade de perfuração dos demais poços; a informação por ele fornecida já elimina a dúvida quanto aos limites do reservatório. Desta forma, há a necessidade de avaliar o impacto que essa abordagem possui no cálculo do VDI e propor uma maneira de corrigir as estratégias levando em conta as possíveis variações dos modelos estruturais no curso da decisão e não apenas no início do processo decisório, ajustando também o número de poços secos, o que será tratado por esse trabalho posteriormente.

Hayashi (2006) aplica os conceitos de valor da informação e de flexibilização propostos por Xavier (2004) para determinar o valor da aquisição de novas informações, considerando um atraso no cronograma causado pela flexibilização do momento de definição do projeto definitivo. Uma técnica baseada nos modelos representativos e na árvore de decisão é aplicada no processo de decisão. Os resultados mostraram que a metodologia proposta é aplicável em modelos de grande porte, onde a relevância da aquisição de informações aumentou em cenários de preço de óleo mais baixo e a importância da análise da redução de risco associada ao retorno financeiro no processo de decisão.

Além disso, a autora ressalta algumas conclusões referentes ao processo de cálculo do valor da informação:

- O VME é sempre crescente com a quantidade de aquisição de informação e com o número de estratégias otimizadas, ou seja, o valor da informação tem a tendência de crescimento com o grau de sofisticação do processo empregado.
- A confiabilidade no cálculo do VDI aumenta com o número de simulações (número de MR, processo de otimização etc.), ou seja, processos simplificados tendem a subestimar o VDI;
- A análise completa para cada cenário econômico pode trazer benefícios adicionais para o cálculo do VDI, mas demanda um esforço computacional adicional devido à necessidade de otimização de estratégia para os diferentes cenários econômicos.

Por utilizar a metodologia tradicional de análise de risco e de quantificação do VDI proposta por Xavier (2004), a autora não considera flexibilidade na estratégia de produção,

apenas se prevalece da oportunidade de um tipo de flexibilização (desenvolvimento do campo por módulos) para agregar valor ao projeto, sem proporcionar alterações efetivas nas facilidades no desenvolvimento do projeto. Mas vale ressaltar que, no início desta fase, a flexibilidade mais importante a ser considerada é o número e a posição de poços, pois, caso haja alguma alteração na estratégia de desenvolvimento ao longo da perfuração dos poços, há a possibilidade de redefinições na estratégia sem muitos prejuízos ao projeto.

### **3.2 Estratégia de Produção**

A seleção de uma estratégia de produção para um plano de desenvolvimento não é uma tarefa simples. Envolve uma grande quantidade de parâmetros inter-relacionados a serem definidos e ajustados, como o método de otimização que pode ser empregado, o uso de processos manuais ou automáticos, assistidos ou diretos, análise de diferentes funções-objetivo etc. Todavia, a otimização de todos os parâmetros envolvidos na estratégia não implica na unicidade da solução, onde a estratégia encontrada é a melhor dentre todas as possíveis. Assim, a definição da estratégia de produção torna-se uma das tarefas mais complexas dentro da engenharia de petróleo.

Santos (2002) desenvolveu uma metodologia manual de otimização de estratégia com o objetivo de maximizar o VPL do projeto, através de um conjunto de ações aplicado ao modelo de simulação. As ações são sequenciais e consistiam em:

- Remover poços produtores que apresentem VPL negativo;
- Reordenar cronograma de entrada em operação a partir do VPL individual dos poços;
- Avaliar a possibilidade de realocação de poços produtores ou injetores;
- Remover os injetores menos importantes;
- Desativar canhoneios com produção de óleo desprezível;
- Remover produtores de menor expressão;
- Converter produtores em injetores.

Se, ao aplicar um passo, ocorresse ganho no valor da função-objetivo, a modificação era preservada no modelo de simulação e o passo seguinte era executado. Caso contrário, o modelo era mantido e o passo seguinte executado. Para maximizar a otimização, cada modelo era submetido ao conjunto de passos de otimização uma segunda vez, ao fim da qual se considera que a otimização foi concluída. Rodadas posteriores são desconsideradas, pois segundo testes efetuados, os ganhos passam a ser progressivamente menores e pouco significativos.

A definição da estratégia de exploração do campo é uma parte importante do processo de desenvolvimento, mas é necessário verificar a possibilidade da sua implantação na prática. Para Santos (2002), uma taxa de entrada de poços em operação deve ser adotada de acordo com a disponibilidade estimada de sondas de perfuração e completação. Ao mesmo tempo ou após a entrada em operação de um produtor escolhe-se o melhor injetor disponível ao seu redor, de modo a compensar a queda de pressão da área drenada desse produtor.

Como forma de avaliar a qualidade dos poços produtores e injetores, o autor utiliza um procedimento onde se simula o reservatório com todos os poços entrando simultaneamente em operação e calculam-se os VPL individuais. No caso dos poços injetores, eles não geram receitas diretamente e, já que todos os injetores têm o mesmo custo inicial, o melhor injetor é aquele que apresenta o VPL mais negativo (ou o maior em valores absolutos), pois isso indica que o mesmo injetou maior volume, e mais cedo, que os demais. Em outras palavras, trata-se de ordenar os injetores pela sua injeção “atualizada”. No caso dos poços produtores, o melhor poço é aquele com VPL mais positivo, que indica alta produtividade e maior retorno produtivo.

Mezzomo (2005) propôs uma metodologia de seleção de estratégias de produção para auxiliar em processos de tomada de decisão. O método apresenta flexibilidade e robustez, através da combinação de etapas manuais e automatizadas de seleção e otimizações, visando definir os itens que compõe uma estratégia de produção. Além disso, são associadas ferramentas de análise de decisão e avaliação de risco para considerar diversas ordens de riscos, como mostra a Figura 3.3. O processo de seleção possui caráter iterativo e permite que algumas fases sejam revistas e otimizadas novamente, sem necessidade de sequência da ordem indicada.

A metodologia consiste de quatro etapas principais e fases contidas em cada uma das etapas, como segue:

***Etapa A: Etapa manual de definição dos parâmetros básicos.***

- *Fase 1:* definição do método de recuperação a ser empregado, com base nas características do reservatório e nas propriedades dos fluidos (produção primária, injeção de água; uso de métodos térmicos ou químicos) e a geometria dos poços (vertical, horizontal ou direcional).
- *Fase 2:* diferentes configurações de produção-injeção são propostos e avaliados de acordo com o método de recuperação, com o tipo e geometria dos poços. Os esquemas de produção-injeção propostos (padrões *x*-spot, injeção periférica, arranjo linear etc.) devem considerar os recursos técnicos e econômicos disponíveis, bem como as dimensões do campo e áreas de drenagem para cada poço.

***Etapa B: Etapa automatizada de definição dos parâmetros básicos.***

- *Fase 3:* o objetivo desta etapa é obter uma estimativa adequada do número de poços para as configurações, considerando a(s) função(ões) objetivo(s) proposta(s) para o estudo e procurar um equilíbrio entre o esforço computacional e a confiabilidade dos resultados. Diferentes soluções podem ser aceitas nesta fase e serem analisadas nas fases seguintes.
- *Fase 4:* compreende a definição dos parâmetros operacionais com base nos investimentos e custos, bem como sobre o perfil de recuperação do campo. Os parâmetros essenciais que podem ser considerados neste processo são o cronograma de abertura dos poços para iniciar a injeção de água, a produção e taxas de fluxo de injeção e restrições econômicas e operacionais.

Caso o objetivo do processo seja a avaliação de diferentes estratégias, ou a determinação do fator ótimo de recuperação, o processo pode ser concluído neste momento. Por outro lado, se o processo visa à avaliação de risco ou avalia a sensibilidade da estratégia de diferentes cenários técnicos ou econômicos, as próximas etapas devem ser seguidas a fim de obter melhores e mais completas soluções.

***Etapa C: Etapa de Análise de Risco***

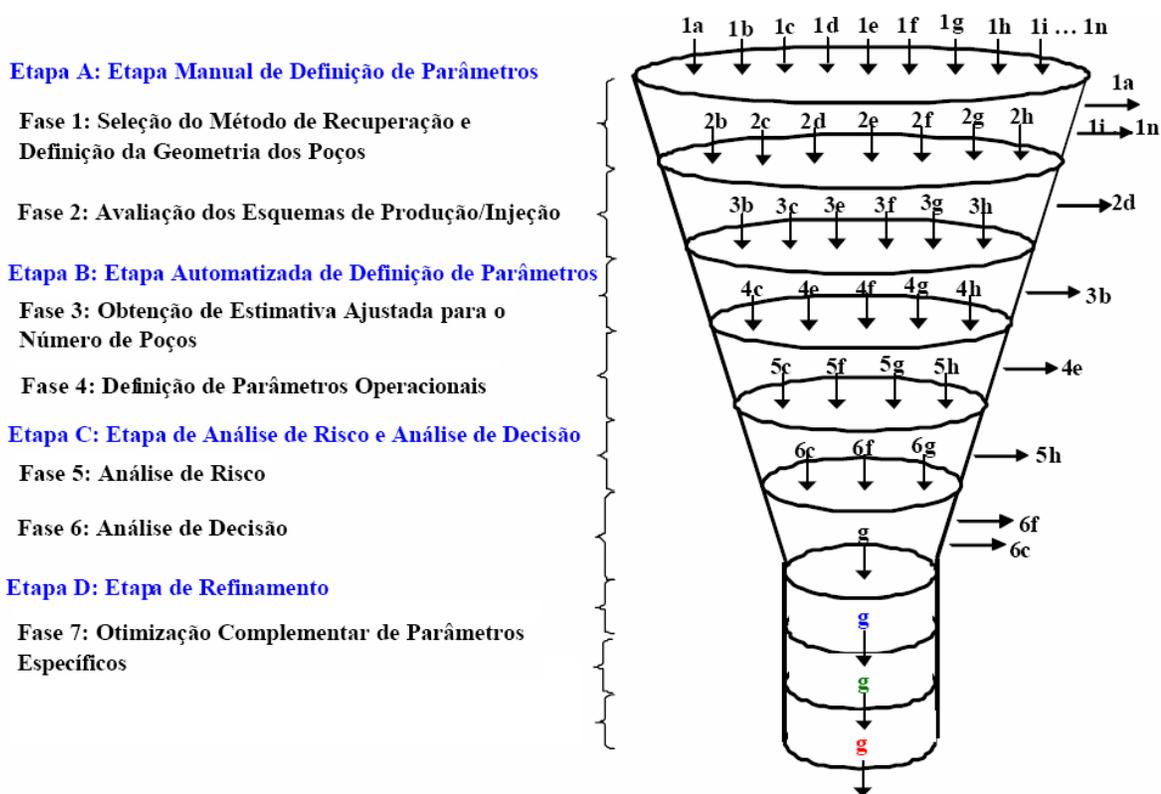
- *Fase 5:* análise de risco tem como objetivo a avaliação do impacto das incertezas geológicas e econômicas sobre a escolha da estratégia de produção. Durante as fases

iniciais do desenvolvimento de um campo de petróleo, a quantidade de informação disponível é limitada. Esta falta de conhecimento sobre as características e propriedades do reservatório e dos fluidos leva a erros de cálculo sobre o possível desempenho nas fases de avaliação e desenvolvimento.

- *Fase 6:* a análise de decisão é realizada de acordo com os objetivos e prioridades do projeto.

**Etapa D: Etapa de Refinamento**

- *Fase 7:* onde parâmetros específicos são otimizados. Esta metodologia é flexível, podendo ser usada em qualquer fase mesmo se as etapas anteriores forem definidas utilizando outras metodologias ou fontes de informação.



**Figura 3.3.** Etapas do processo de seleção e otimização de estratégia de produção (Mezzomo, 2005).

Ravagnani *et al.* (2009) aplicam um processo manual de otimização de estratégia baseado nos trabalhos de Santos (2002) e Mezzomo (2005), visando estabelecer um arranjo ótimo de poços

em um reservatório, através do adensamento de poços na malha de simulação e retirada manual de poços produtores e injetores de baixo desempenho.

A eliminação dos poços com baixo desempenho é uma etapa importante do processo de seleção, onde há a necessidade de avaliação individual dos poços. O Indicador Econômico de Poços (IEP) é um conceito econômico introduzido pelos autores, que busca desvincular os impostos, taxas, contribuições e investimentos agregados ao campo dos investimentos dos poços, passando a considerar apenas as receitas, custos e investimentos do próprio poço. O objetivo é avaliar o potencial de produtividade ou injetividade de cada poço, tendo assim um indicador comparativo entre os poços produtores ou injetores, com o propósito de auxiliar no processo de escolha de estratégia de produção. As tributações e os investimentos do campo, tais como plataformas e outros equipamentos, são levados em conta no VPL, que é usado para avaliar o desempenho econômico do campo.

Os indicadores utilizados para avaliar poços individuais são:

- IEPP (Indicador Econômico de Poços Produtores)
- IEPI (Indicador Econômico de Poços Injetores)

Para o poço produtor, o IEPP engloba a soma das receitas da venda de óleo e gás subtraídos dos custos de produção de óleo, gás, água e do investimento do poço. Para o poço injetor, o IEPI considera a somatória dos custos de injeção de água, gás e investimento do poço.

A primeira fase de sua análise consiste na estimativa aproximada do número de poços e a abertura simultânea destes como forma de medir o desempenho de todos de maneira igual. No entanto, essa abordagem não condiz com a realidade da exploração econômica das reservas de petróleo, uma vez que seria necessário um número de sondas de perfuração igual à quantidade de poços para a realização simultânea da perfuração, tornando o custo dessa operação extremamente elevado. Como não é coerente denominar o resultado financeiro desta simulação como VPL, foi proposto pelos autores o uso do Indicador Econômico do Campo (IEC). O conceito desse indicador é equivalente ao VPL, entretanto, é aplicado quando todos os poços são abertos simultaneamente no início da simulação, resultando na medição do potencial econômico do campo enquanto esse não possuir um cronograma de entrada dos poços.

Após a retirada preliminar dos poços, um poço produtor e um injetor são abertos a cada dois meses, com três diferentes cronogramas de abertura de poços, variando a ordem de abertura segundo o IEPP e IEPI. Desta forma, pretende-se remover mais alguns poços e configurar uma estratégia otimizada de produção. Mas analisando a aplicação da otimização de estratégia proposta por Ravagnani *et al.* (2009) constatam-se algumas limitações devido ao uso do processo manual. No início da otimização, define-se a retirada de dois a três poços produtores de pior IEPP por rodada de simulação, até encontrar o número ótimo de produtores do modelo (quando a retirada de mais poços não proporciona aumento no valor do IEC). Somente após a retirada dos produtores é que são excluídos os injetores, até chegar ao máximo IEC geral.

No entanto, observa-se no gráfico de IEC vs. total de poços que, na passagem entre a retirada dos produtores e injetores foi feita apenas a simulação de mais uma estratégia. Desta forma, é possível que o valor do IEC encontrado seja um máximo local e não global, já que o processo não testou a totalidade dos poços do modelo. Outro detalhe, cada poço da estratégia possui influência nos demais, ou seja, a cada retirada feita alteram-se os valores dos IEP dos demais poços da estratégia. Assim, para se chegar a estratégia ótima neste caso, todos os poços deveriam ser analisados individualmente e não retirados de forma conjunta; isso com certeza resultaria em uma estratégia final diferente daquela obtida pelos autores.

Como visto acima, o processo manual de otimização possui algumas limitações, que poderiam ser resolvidas se um processo automatizado fosse implantado. Com os recentes avanços computacionais, diversas metodologias para determinar as estratégias de produção vêm se aperfeiçoando e esforços foram feitos no sentido de propor métodos que integrem procedimentos manuais e automatizados, não apenas no processo de seleção como também refinamento da estratégia selecionada.

Dentre as discussões levantadas sobre a utilização de processos manuais ou automáticos na seleção da estratégia de produção, não há uma definição clara sobre qual é o melhor processo. Os defensores do processo manual consideram que a experiência do profissional envolvido influi diretamente na definição da estratégia, tanto na escolha da configuração de poços (maximizando a função-objetivo pretendida), quanto na alocação de poços (possibilitando uma melhor análise e drenagem de regiões do campo). Entretanto, o processo manual limita-se a um número reduzido de testes para avaliar outras possíveis opções, que poderiam aumentar a rentabilidade e a

produção do campo. Já os defensores de processos automáticos consideram a quantidade de testes possíveis e varredura do espaço-solução como as grandes vantagens do processo. A elevada quantidade de soluções testadas pode levar a uma solução melhor que em um processo manual, porém, ainda com a necessidade de muitas simplificações.

Nogueira (2008) propõe uma nova abordagem para a otimização, onde a estratégia de produção é otimizada simultaneamente em todos os cenários econômicos e modelos geológicos representativos considerados, através do uso de algoritmo genético. Esse algoritmo emprega um processo sequencial evolutivo, cujos indivíduos utilizam informações obtidas em simulações anteriores para melhorar o processo de otimização.

## **4. METODOLOGIA**

Neste capítulo, é realizada a descrição da metodologia desenvolvida, que tem como objetivo orientar o processo de quantificação do valor da informação quando há incerteza no modelo estrutural, com a possibilidade de alterações futuras na estratégia adotada para o campo. No início, é mostrada a descrição geral da metodologia desta dissertação, descrevendo as etapas seguidas para se atingir os objetivos propostos. Em seguida, são detalhadas as metodologias de quantificação de VDI e otimização e seleção de estratégias de produção, mostrando a forma de cálculo do valor da informação com a incorporação de flexibilidade operacional.

### **4.1 Metodologia Geral da Dissertação**

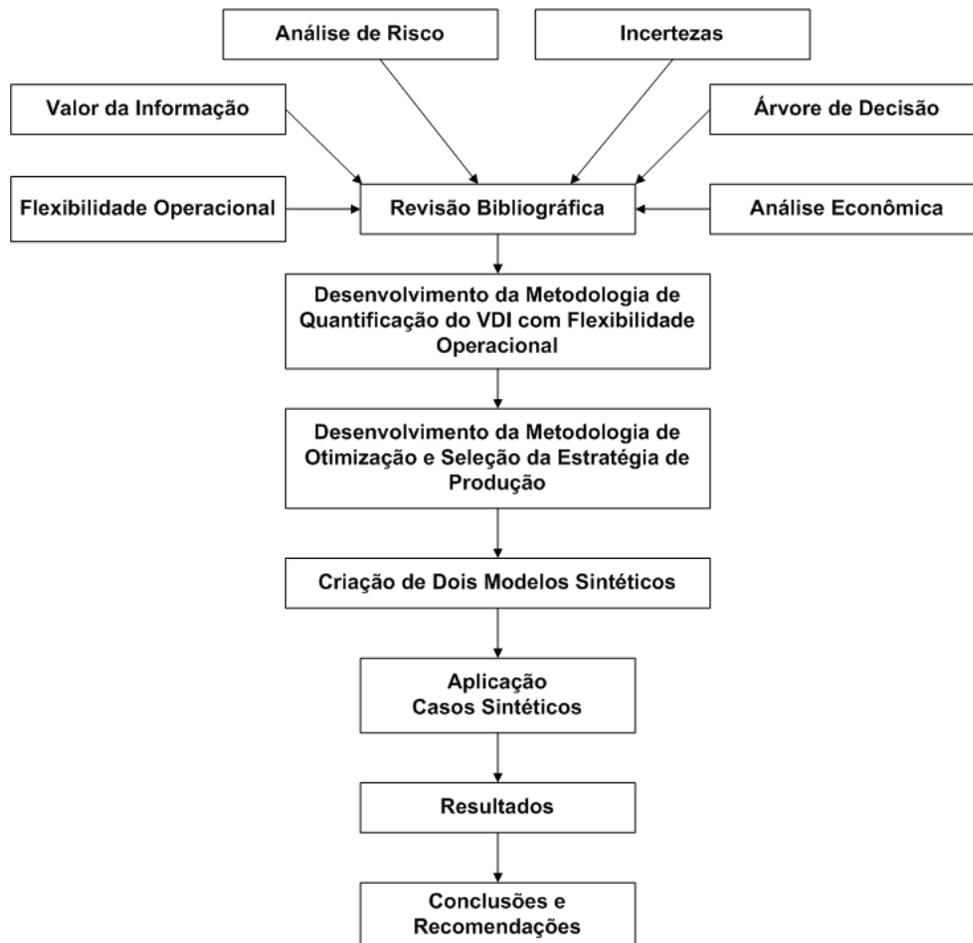
A proposta de criação e validação de uma metodologia de quantificação do valor da informação que incorpore flexibilidade operacional consistiu em várias etapas. A princípio, uma revisão bibliográfica geral sobre o valor da informação foi feita para verificar o que já havia sido proposto anteriormente na literatura e poderia servir como base para esse trabalho.

A segunda etapa incidiu no desenvolvimento da metodologia de quantificação do VDI a ser aplicada no trabalho, como proposta de solução para o problema apresentado. No processo de validação da metodologia, foi constatada a necessidade de uma terceira etapa, que envolve o desenvolvimento de um processo automatizado e assistido de otimização e seleção de estratégia, devido à elevada quantidade de modelos estruturais incertos.

A quarta etapa consistiu na aplicação da metodologia em dois exemplos, ambos os quais foram criados a partir de um modelo sintético simples de um reservatório conhecido. No primeiro exemplo, apenas o tamanho do reservatório é incerto; neste caso, utiliza-se a metodologia apenas para validar a abordagem de quantificação do VDI proposta por esse trabalho. No segundo exemplo, duas falhas de transmissibilidade são inseridas para dividir a estrutura do reservatório segundo os modelos estruturais pessimista, provável e otimista e mais três atributos incertos são

analisados de forma conjunta, para testar o potencial da metodologia com o aumento do número de cenários incertos.

Na quinta etapa, foi feita a aplicação da metodologia, com intuito de estudá-la e validá-la, entendendo suas vantagens e limitações. Por fim, a etapa final consistiu na avaliação dos resultados e na elaboração das conclusões e recomendações para futuros trabalhos. A Figura 4.1 mostra o fluxograma da metodologia geral da condução dessa dissertação.



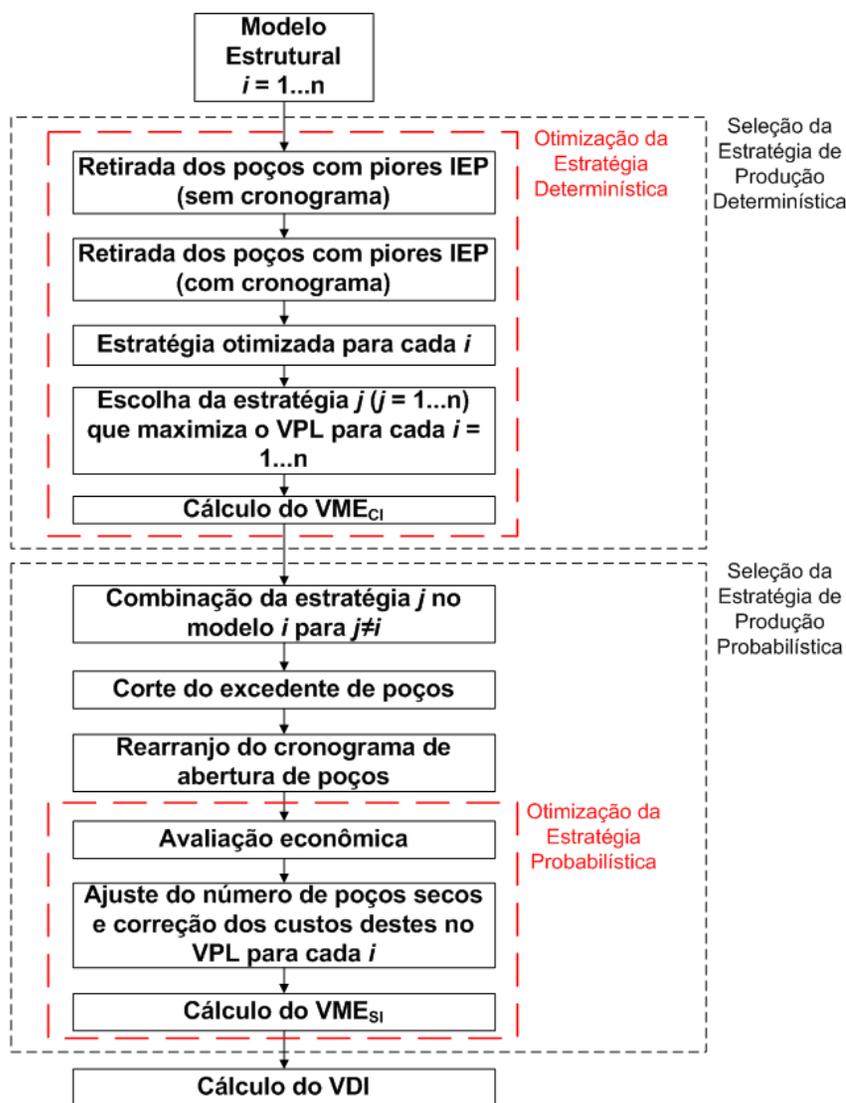
**Figura 4.1.** Fluxograma geral da metodologia aplicada na dissertação.

## 4.2 Metodologia de Quantificação do VDI com Flexibilidade Operacional

A metodologia de cálculo do VDI segue as mesmas etapas propostas por Xavier (2004), descritas no Item 3.1 da revisão bibliográfica, com exceção das Etapas 10 e 11, que correspondem aos cálculos do  $VME_{SI}$  e  $VME_{CI}$ , respectivamente. Neste ponto, é proposta a

metodologia deste trabalho considerando a flexibilidade operacional com relação ao ajuste do número de poços nos modelos estruturais incertos (sem informação). Desta forma, as estratégias de produção não serão fixas, mas flexíveis, ou seja, se no decorrer da perfuração dos poços o modelo estrutural for diferente do esperado, há a possibilidade de alterações na estratégia de produção.

O fluxograma da Figura 4.2 descreve a forma de cálculo dos  $VME_{CI}$ ,  $VME_{SI}$  e VDI proposta por esta metodologia.



**Figura 4.2.** Fluxograma do procedimento de cálculo do VDI com flexibilidade em número de poços.

### 4.3 Seleção da Estratégia de Produção Determinística (VME<sub>CI</sub>)

A metodologia proposta para a seleção da estratégia de produção para cada modelo determinístico considerado é baseada nos trabalhos de Santos (2002) e Mezzomo (2005), consistindo em seis fases principais:

- **Fase 1:** Preparação dos arquivos de entrada do simulador de fluxo.
- **Fase 2:** Definição dos parâmetros operacionais e econômicos a serem utilizados;
- **Fase 3:** Preenchimento completo da malha de simulação dos modelos com poços, segundo a configuração pré-definida nos parâmetros operacionais.
- **Fase 4:** Aplicação do algoritmo de otimização de estratégia nos modelos para retirar os poços de pior desempenho (IEP), com todos os poços abrindo simultaneamente.
- **Fase 5:** Reaplicação do algoritmo para retirar outros poços de pior desempenho restantes, quando são aplicadas algumas opções de cronograma de desempenho e abertura de poços.
- **Fase 6:** Selecionar a estratégia de produção que maximiza o VPL do campo.

A flexibilidade operacional não foi incorporada nas fases descritas acima, o que ocorre apenas na seleção da estratégia de produção probabilística, descrita no Item 4.4 desta metodologia. Abaixo, as fases do processo de seleção da estratégia determinística estão descritas com maior detalhe.

#### 4.3.1 Preparação dos arquivos de entrada do simulador de fluxo

A preparação dos arquivos de entrada do simulador de fluxo, também conhecidos por arquivos (\*.dat), foi feita para adequar os modelos estruturais incertos que serão analisados posteriormente. Pode ser dividida em dois procedimentos:

- Alteração estrutural do modelo base para compor os modelos de simulação.

Nos dois exemplos deste trabalho, um modelo sintético retangular foi utilizado como base para compor os modelos pessimista, provável e otimista, através do CMG-Builder®. No primeiro exemplo, os modelos foram gerados a partir da anulação de blocos na malha de simulação em diversas camadas, resultando em três modelos estruturais distintos, porém, com as mesmas

características petrofísicas, como mostra a Figura 5.2. No segundo exemplo, o modelo estrutural permaneceu o mesmo do modelo base, porém, a inserção de duas barreiras de transmissibilidade dividiu os modelos em pessimista, provável e otimista, conforme a Figura 5.3.

- Inserção de palavras-chave no arquivo de entrada.

A inserção de palavras-chave é feita para possibilitar alterações em alguns parâmetros de simulação quando são feitas as leituras pelo algoritmo de otimização de estratégia (escrito em MATLAB®), pelo Módulo de Análise de Incertezas (UNIPAR-MAI®), Módulo de Análise Econômica (UNIPAR-MEC®) e simulador de fluxo do tipo *Black-oil* CMG-IMEX®. Essas palavras-chave são inseridas diretamente no arquivo (\*.dat) e são essenciais para o funcionamento da metodologia. A explicação detalhada das palavras-chave inseridas no modelo é mostrada no Anexo I.

#### **4.3.2 Definição dos parâmetros operacionais e econômicos**

Nesta fase, o usuário precisa definir três parâmetros operacionais principais que serão empregados na fase seguinte do processo de seleção da estratégia: o método de recuperação, a geometria dos poços e a escolha do esquema de produção/injeção do campo. Os parâmetros que devem ser utilizados na análise econômica são basicamente os custos, investimentos e preços de venda do óleo e gás. Além disso, é necessário definir como parâmetro econômico o custo da plataforma segundo a sua capacidade de produção. Esse dado é importante, pois a partir desta correlação serão definidos os custos atualizados da plataforma a cada iteração do algoritmo de otimização da estratégia.

#### **4.3.3 Preenchimento completo da malha de simulação com poços**

Uma maneira de estabelecer um arranjo ótimo de poços em um reservatório é preenchê-lo com uma grande quantidade de poços e eliminar progressivamente aqueles com baixo potencial (Santos, 2002; Mezzomo, 2005) que afetam negativamente a função-objetivo a ser analisada. Assim, a adoção do preenchimento completo da malha com poços tem como objetivo garantir que, ao término da otimização, todas as regiões do reservatório sejam testadas quanto ao seu

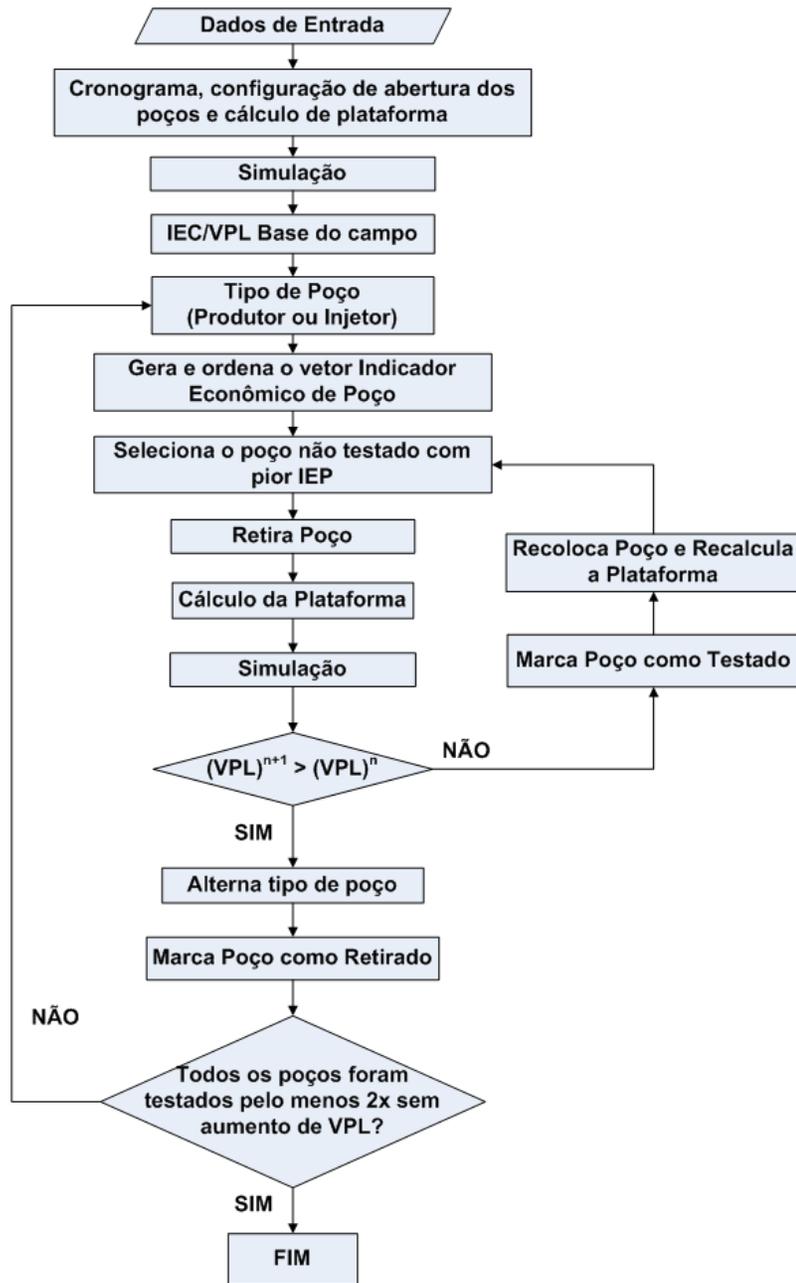
potencial de produção. Nessa fase, o esquema de produção e injeção escolhido para o campo é aplicado integralmente no modelo de simulação. Mas, pela variação nos tamanhos dos reservatórios, alguns poços e canhoneios podem ficar alocados em regiões externas ao reservatório e devem ser removidos.

Nessa fase, o número inicial de poços deve ser bem maior do que o número esperado de poços para o reservatório pois é necessário cobrir todas as regiões. Deve-se também fazer os testes com todos os poços sendo abertos ao mesmo tempo já que o objetivo desta fase é encontrar as regiões com bom potencial de produção e, para isso, a abertura simultânea de poços possibilita uma comparação mais justa entre eles. Entretanto, por este motivo, os VPL das estratégias obtidos nessa fase não são reais ou viáveis e, portanto, chamados de IEC.

#### **4.3.4 Aplicação do algoritmo de otimização**

A análise do modelo estrutural como um atributo incerto implica na necessidade de otimização de várias estratégias para diferentes volumes de reservatório, o que seria inviável através de um processo manual. Desta forma, foi proposta uma metodologia automatizada e assistida de otimização de estratégia de produção, através da implementação de um algoritmo que integra análise econômica e simulação numérica de reservatórios, contemplando as Fases 4 e 5 da metodologia de seleção da estratégia proposta acima.

A Figura 4.3 mostra o fluxograma com a descrição do funcionamento do algoritmo. Os dados de entrada que são necessários para o algoritmo são: o arquivo de entrada do simulador (\*.dat), com as palavras-chave descritas no Item 4.3.1, o arquivo de projeto do MEC (*Otimizacao.mec*) configurado e o arquivo com os parâmetros econômicos e o custo da plataforma de produção (*ArqSecfin.secfin*). A preparação dos arquivos de projeto e econômico do MEC é necessária para garantir o funcionamento pleno do algoritmo e estão descritos no Anexo II.



**Figura 4.3.** Fluxograma do processo de otimização da estratégia de produção.

A partir da configuração dos arquivos de entrada, o próximo passo a ser definido pelo usuário é a opção de cronograma de perfuração e de abertura dos poços segundo o desempenho, cuja escolha é determinante para a permanência ou retirada dos poços do modelo de simulação. Desta forma, o algoritmo foi proposto com quatro opções de cronograma de perfuração dos poços e cinco opções de abertura por desempenho, segundo a Tabela 4.1 e Tabela 4.2, respectivamente.

**Tabela 4.1.** Configurações de cronograma de perfuração de poços.

<b><i>Cronograma de Perfuração dos Poços</i></b>	
<b><i>Opção 0.0</i></b>	Todos os poços são perfurados simultaneamente.
<b><i>Opção 1.1</i></b>	Perfuração de 1 poço produtor e 1 injetor a cada 30 dias.
<b><i>Opção 1.2</i></b>	Perfuração de 1 poço produtor e 2 injetores a cada 30 dias.
<b><i>Opção 2.1</i></b>	Perfuração de 2 poços produtores e 1 injetor a cada 30 dias.

**Tabela 4.2.** Configurações de cronograma de abertura dos poços segundo o desempenho.

<b><i>Cronograma de Abertura dos Poços por Desempenho</i></b>	
<b><i>Opção 1</i></b>	Poços Produtores: abrem dos melhores para os piores Poços Injetores: abrem dos melhores para os piores
<b><i>Opção 2</i></b>	Poços Produtores: abrem dos piores para os melhores Poços Injetores: abrem dos piores para os melhores
<b><i>Opção 3</i></b>	Poços Produtores: abrem dos melhores para os piores Poços Injetores: abrem dos piores para os melhores
<b><i>Opção 4</i></b>	Poços Produtores: abrem dos piores para os melhores Poços Injetores: abrem dos melhores para os piores
<b><i>Opção 5</i></b>	Ordem sequencial de abertura conforme descrito no arquivo de entrada.

A configuração de cronograma que deve ser inserida na entrada do algoritmo combina as opções do cronograma de perfuração e de abertura de poços, formando uma opção única. A opção 0.0 do cronograma de perfuração só pode ser combinada com a opção 5 do cronograma de abertura por desempenho. As demais combinações, em um total de doze, podem ser formadas e serão utilizadas no Item 4.3.5 quando o algoritmo for reaplicado no modelo pré-otimizado.

A configuração 0.0.5 é voltada apenas para a primeira aplicação do algoritmo, na qual todos os poços são perfurados e abertos simultaneamente no início da simulação, como forma de

comparar os poços de maneira igual com relação ao desempenho. A função-objetivo a ser analisada neste caso é o Indicador Econômico do Campo (IEC).

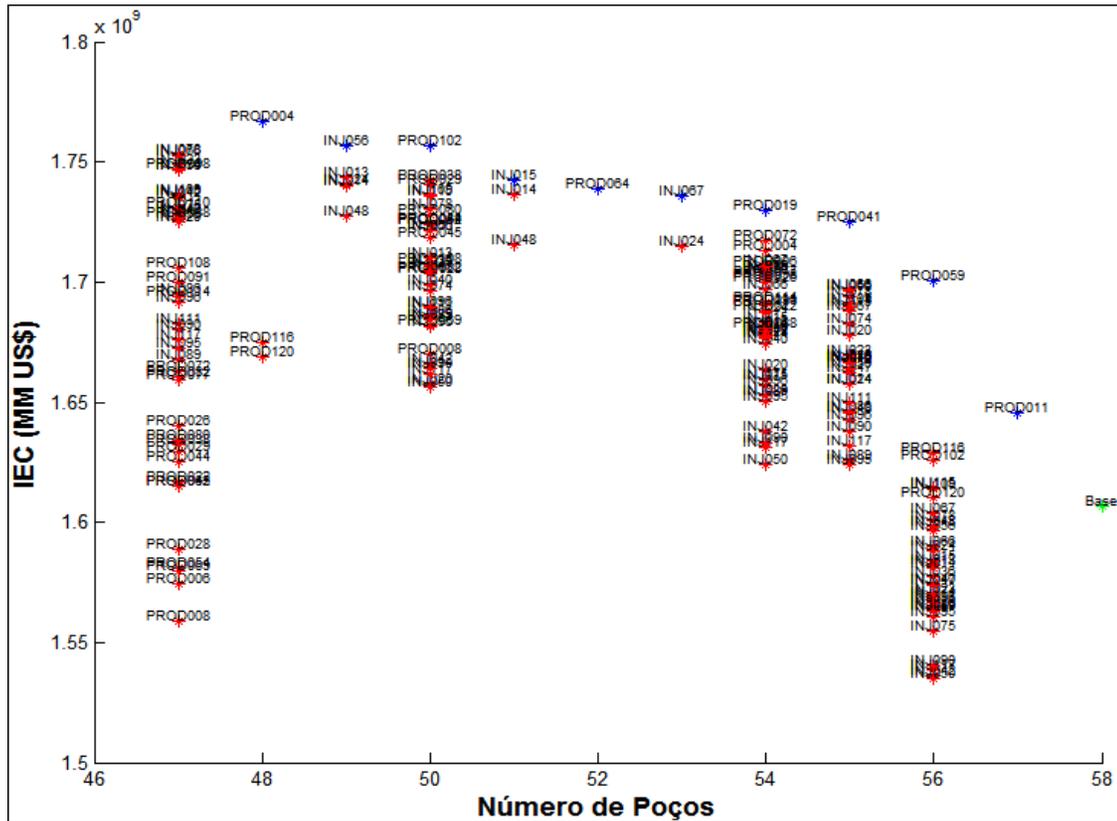
Após a preparação dos arquivos de entrada e escolha da configuração 0.0.5 inicia-se a parte automatizada do processo de simulação, através do MEC. A primeira iteração da simulação consiste em determinar o custo da plataforma de produção (segundo o número inicial de poços produtores do modelo considerado) e o valor inicial (base) do IEC.

Com o término da primeira iteração tem início o teste para a retirada sequencial dos poços com pior IEP; no caso dos produtores, se exclui aqueles com baixa produtividade, e no caso dos injetores aqueles com baixa injetividade. O propósito da retirada sequencial de poços é a possibilidade de teste dos poços por diversas vezes em diferentes momentos da otimização. No entanto, a retirada só é feita se a exclusão do poço proporcionar aumento no IEC. Em caso positivo, ele é definitivamente retirado, reiniciando o processo com o outro tipo de poço. Caso contrário, ele é marcado e mantido na estratégia (podendo ser testado novamente em outra iteração), passando para o próximo poço com pior índice, e assim sucessivamente.

No início da otimização por busca exaustiva não se encontra dificuldades para a retirada dos primeiros poços, já que possuem os piores desempenhos. Quando estes começam a se esgotar e os testes se iniciam com os poços de médio e alto desempenho, o número de testes necessários para retirar um poço aumenta consideravelmente. Caso o algoritmo esteja testando um tipo de poço (como os produtores, por exemplo) e todos terem sido testados, sem proporcionar aumento no IEC, ele passa automaticamente a testar todos os poços do outro tipo (injetores), como pode ser observado nas primeiras iterações da Figura 4.4. Se o teste destes injetores não resultar em nenhuma retirada adicional, o algoritmo é finalizado. O algoritmo de otimização da estratégia também se encerra quando todos os poços produtores e injetores restantes no modelo considerado foram testados, ao menos duas vezes, sem aumento do IEC do campo, o que ocorre na última iteração mostrada na Figura 4.4.

É importante destacar que a cada iteração do algoritmo é calculado o custo da plataforma de produção, considerando o número de poços produtores. A cada poço produtor excluído diminui-se o valor da plataforma, o que contribui para a correção da capacidade de produção e um valor mais apurado do IEC quando definida a estratégia de exploração para o campo.

No término do processo, o algoritmo entrega como saídas o arquivo de entrada com a estratégia ótima de produção, o arquivo econômico atualizado com o valor da plataforma de produção e outros arquivos de dados para análise.



**Figura 4.4.** Poços testados em uma retirada feita pelo algoritmo.

#### 4.3.5 Replacação do algoritmo de otimização

Após a primeira aplicação do processo de otimização da estratégia, que retirou a maior parte dos poços, é necessário adequar a estratégia resultante para uma situação real, com a implementação do cronograma de perfuração e abertura dos poços. Foram propostos para o algoritmo algumas configurações que ficassem dentro dos limites reais encontrados em projetos de E&P, especialmente quanto à perfuração dos poços.

A inclusão do cronograma possui impacto direto na produção, o que possibilita a retirada de mais alguns poços com baixo indicador econômico. Nesta fase, portanto, a função-objetivo é

alterada do IEC para o VPL do campo, sem a necessidade de alterações no arquivo de entrada da simulação e nos procedimentos de teste do algoritmo descritos no Item 4.3.4.

Desta forma, na reaplicação do algoritmo, são doze configurações de cronograma a serem testadas: 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.1.4; 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4; 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, como mostram as Tabelas 4.1 e 4.2. Essas configurações são responsáveis por rearranjar o arquivo de entrada, inserindo o comando de abertura dos poços nos tempos da simulação, conforme a opção escolhida pelo usuário. Em cada uma, os poços são testados e o algoritmo se encerra quando alcança o máximo VPL do campo para a configuração.

#### **4.3.6 Seleção da Estratégia que Maximiza o VPL do Campo**

O processo de seleção da estratégia determinística é finalizado com a escolha dentre as opções de cronograma testadas, daquela que maximiza o VPL do campo para o modelo considerado. O cálculo do  $VME_{CI}$  é realizado como proposto por Xavier (2004), ao final do Item 3.1, na Etapa 11 de sua metodologia.

#### **4.4 Seleção da Estratégia de Produção Probabilística ( $VME_{SI}$ )**

Até esse ponto, nenhuma flexibilidade foi incluída na metodologia já que as estratégias foram definidas para os modelos estruturais considerados certos, não havendo a necessidade de ajuste no número de poços. Na seleção da estratégia de produção probabilística, que contempla o caso sem informação, as estratégias determinísticas são fundamentais para incorporar a flexibilidade operacional ao projeto e calcular o valor monetário esperado para cada modelo estrutural incerto.

A flexibilidade do ajuste do número de poços nos modelos é feita inicialmente permutando-se as estratégias determinísticas nos demais modelos estruturais incertos. Por exemplo, no caso de modelo estrutural ser discretizado em três níveis de incerteza, a estratégia pessimista é inserida nos modelos estruturais provável e otimista; a estratégia provável é inserida nos modelos estruturais pessimista e otimista e a estratégia otimista é inserida nos modelos estruturais pessimista e provável.

O próximo passo é o corte do excedente de poços. Em alguns casos, o modelo estrutural comporta a estratégia determinística inserida nele, não sendo preciso retirar nenhum poço; em outros, vários poços ficam alocados em regiões externas ao reservatório e devem ser retirados da malha de simulação<sup>3</sup>. Os poços resultantes estão ajustados em conformidade com cada modelo incerto, porém, a retirada dos poços desconfigura o cronograma do arquivo de entrada da simulação, apagando o comando de abertura dos poços que foram alocados externamente ao reservatório. Desta forma, é necessário o ajuste manual do cronograma no arquivo de entrada, respeitando a configuração que maximizou o VPL do campo na estratégia determinística.

Com todos os arquivos de entrada ajustados quanto ao número de poços e ao cronograma, inicia-se a avaliação econômica dos casos através do MEC. Cada modelo estrutural é simulado com os arquivos econômicos resultantes da estratégia que foi inserida nele durante a permutação. Por exemplo, se a estratégia provável foi inserida no modelo estrutural pessimista, a simulação ocorre com o arquivo econômico da estratégia provável, com o valor da plataforma otimizada para o modelo estrutural provável.

Após o término das simulações é necessário ajustar o número de poços secos nos modelos incertos e acrescentar o custo destes ao VPL do modelo. O número de poços a ser acrescentado é dependente do modelo onde a estratégia foi inserida. Nesta metodologia foram adotados três níveis de incerteza para o modelo estrutural, o que leva a necessidade de ajuste da quantidade de poços para três modelos, como mostra a Tabela 5.1. Deve-se ajustar o número de poços secos segundo a quantidade de níveis e modelos incertos existentes no projeto. O custo do poço é definido pelo usuário nos parâmetros econômicos do campo.

Terminado os ajustes, as estratégias de produção estão definidas para os modelos incertos. Como forma de facilitar a análise dos dados obtidos, elabora-se uma matriz com os valores de VPL de todas as estratégias, os modelos estruturais e as suas respectivas probabilidades de ocorrência. Essa matriz é importante para o cálculo do  $VME_{SI}$ . O cálculo do valor monetário esperado sem informação permanece da mesma forma proposta por Xavier (2004), realizado através da Equação 3.2.

---

<sup>3</sup> A retirada dos poços e das completações alocadas em blocos nulos é feita através de um recurso do CMG-Builder®.

#### 4.5 Cálculo do VDI

O cálculo do VDI é dado pela Equação 3.1, onde os  $VME_{CI}$  e  $VME_{SI}$  são obtidos pela metodologia proposta por esse trabalho. Além do VDI, a redução do risco também deve ser avaliada através da elaboração das curvas de risco do projeto com e sem informação. No caso com informação a curva é composta pelos modelos cujos valores maximizaram o VME do grupo; no caso sem informação a curva é composta pelos modelos cuja estratégia maximizou o VME.

É importante destacar que uma das premissas de processos de otimização de estratégias de exploração é alcançar a estratégia ótima com o menor número possível de simulações. No entanto, nesta metodologia, não há preocupação quanto à redução do número de simulações, pois, no cálculo do VDI, quanto maior o número de simulações, mais preciso se torna o valor da informação.

## 5. APLICAÇÃO

Como visto previamente, nos cenários sem informação, a análise de risco tradicional adota uma estratégia de exploração fixa e definida com base nas informações adquiridas durante a fase de exploração, sem considerar qualquer tipo de flexibilidade operacional. No entanto, em cenários de início de desenvolvimento (no qual o campo acaba de ser descoberto a partir da perfuração de um poço pioneiro) e o tamanho do reservatório não é conhecido com certeza, essa abordagem deve ser revista para uma estratégia de recuperação flexível, que minimize as perdas do projeto se houver alterações em eventos futuros do projeto, como a presença de regiões secas.

O exemplo a seguir ilustra o problema encontrado. Suponha que o reservatório seja discretizado em três níveis – pessimista, provável e otimista – e as informações adquiridas durante a fase exploratória indicam que o tamanho do reservatório apresenta uma tendência otimista. A estratégia de recuperação é definida, portanto, para 30 poços (10 poços alocados para cada região) e sua plataforma dimensionada para tal configuração. Inicia-se o desenvolvimento do campo com a perfuração do primeiro poço. Neste momento, a região se confirma como produtora e o desenvolvimento prossegue com a perfuração dos demais poços, de acordo com o que fora definido previamente. O mesmo ocorre com a região considerada provável; ou seja, até o momento, o projeto está corretamente dimensionado e seguindo com o curso normal de execução das perfurações.

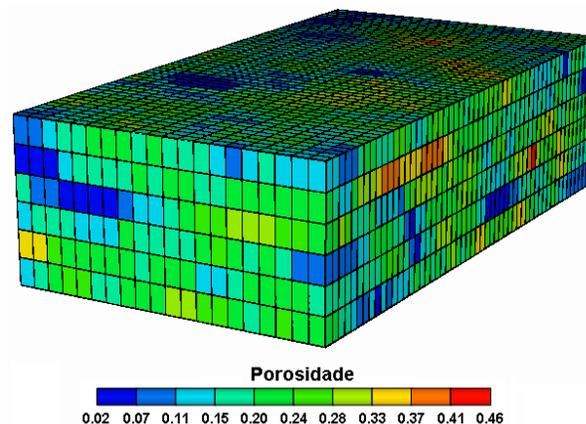
No momento em que é finalizada a perfuração do primeiro poço na região otimista, descobre-se que essa região é seca e não confirma as expectativas previstas no dimensionamento inicial das facilidades. Na análise de risco tradicional, os 8 poços restantes são perfurados mesmo se as informações indicam que aquela é uma região seca, o que torna incoerente com o problema físico e econômico do projeto. As propostas deste trabalho são a avaliação e adequação da quantidade de poços quando houver incertezas relacionadas ao tamanho do reservatório, ou seja, o uso da estratégia flexível de produção na presença de alterações futuras no projeto, como a presença de regiões secas. Neste capítulo, a metodologia proposta no capítulo anterior é aplicada em dois exemplos derivados de um modelo sintético simples de reservatório. No primeiro

exemplo, o objetivo é validar a metodologia proposta e compreender as suas vantagens e limitações, a partir da existência de uma única dúvida no projeto: o tamanho do reservatório. Portanto, em termos da quantificação do VDI, não há a necessidade da obtenção dos modelos representativos por causa da simplicidade da árvore de decisão, caracterizada por possuir poucas ramificações, ou seja, poucos cenários possíveis. Pela simplicidade do caso, os modelos representativos são resultado de todas as combinações dos atributos incertos.

O segundo exemplo é mais elaborado e emprega um maior número de incertezas, todas relacionadas ao modelo estrutural do reservatório. Desta forma, a metodologia de quantificação do VDI com flexibilidade operacional pode ser aplicada integralmente. Neste exemplo, é aplicado o método da árvore completa para o cálculo do VDI, onde todos os atributos incertos são combinados e cada combinação resulta em um modelo de simulação diferente, com estratégia diferente.

## 5.1 Descrição do Modelo

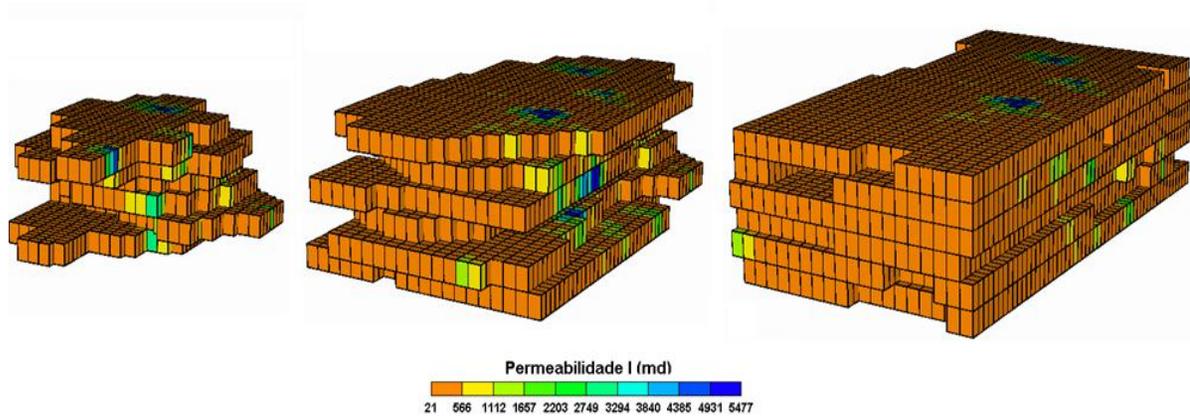
O modelo utilizado como referência em ambos os exemplos é um reservatório simplificado, de forma retangular, apresentado por Maschio e Schiozer (2004), composto por 6600 blocos (20x55x6), onde cada bloco possui dimensões areais de 240m x 160m com espessura constante de 5m, como mostra a Figura 5.1.



**Figura 5.1.** Mapa de porosidade para o modelo utilizado na metodologia.

### 5.1.1 Exemplo I

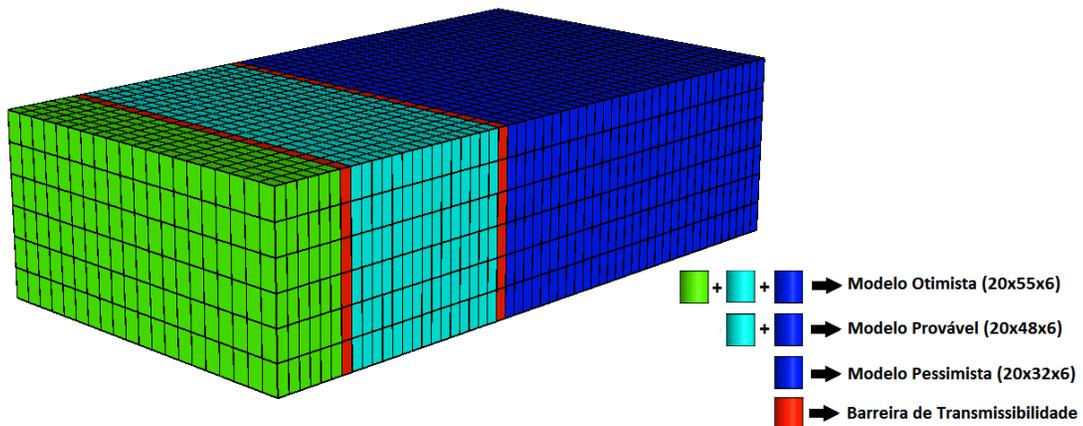
Os modelos estruturais incertos pessimista, provável e otimista são compostos a partir da anulação de blocos do modelo de referência, como mostra a Figura 5.2.



**Figura 5.2.** Mapa de permeabilidade horizontal dos modelos estruturais pessimista, provável e otimista, respectivamente - Exemplo I.

### 5.1.2 Exemplo II

Neste exemplo, os modelos estruturais são formados a partir da separação do modelo de referência por duas barreiras de transmissibilidade, conforme ilustra a Figura 5.3. Além disso, devido à baixa permeabilidade na maior parte do reservatório, foi somado 100 mD aos valores da permeabilidade horizontal e 40 mD aos valores da permeabilidade vertical.



**Figura 5.3.** Modelo de reservatório com incertezas – Exemplo II.

## 5.2 Ajuste do Número de Poços Secos nos Modelos Incertos

Conforme descrito no Item 4.4, é necessário ajustar o número de poços secos nos modelos incertos. Neste trabalho são admitidos três níveis de incerteza, o que resulta em três modelos estruturais incertos a terem os poços secos ajustados, como mostra a Tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** Quantidade de poços secos a serem acrescentados nos modelos incertos.

<i>Modelo Estrutural</i>	<i>Quantidade de Poços Secos Acrescentados</i>
Pessimista	Dois
Provável	Um
Otimista	Nenhum

## 5.3 Atributos Incertos

Os reservatórios encontram-se no início da fase de avaliação e desenvolvimento e possuem incertezas associadas. Todos os atributos incertos foram constituídos por três níveis de incerteza: pessimista (nível 2), provável (nível 0) e otimista (nível 1) e admitidos como independentes entre si, como mostra a Tabela 5.2.

**Tabela 5.2.** Atributos incertos e suas probabilidades de ocorrência.

<i>Atributos</i>	<i>Níveis</i>	<i>Probabilidade</i>
<i>Modelo Estrutural</i>	areas0	0,6
	areas1	0,2
	areas2	0,2
<i>Permeabilidade Vertical</i>	permi0	0,6
	permi2 = permi0 * 0,5	0,2
	permi1 = permi0 * 2,0	0,2
<i>Permeabilidade Horizontal</i>	permk0	0,6
	permk2 = permk0 * 0,5	0,2
	permk1 = permk0 * 2,0	0,2
<i>Porosidade</i>	por0	0,6
	por2 = por0 * 0,8	0,2
	por1 = por0 * 1,2	0,2

No primeiro exemplo, o modelo estrutural é o único atributo incerto estudado; no segundo, todos são analisados.

#### **5.4 Parâmetros Operacionais**

Os parâmetros operacionais e econômicos utilizados no processo permaneceram constantes em todos os exemplos, variando apenas o custo da plataforma para cada modelo segundo a quantidade otimizada de poços.

O declínio repentino da pressão em um reservatório de petróleo provoca uma rápida depleção, o que resulta em um baixo fator de recuperação. Como forma de estabilizar os níveis de pressão do reservatório e garantir a produção por um longo período, a injeção de água é selecionada como o método de recuperação a ser utilizado nesta análise. Além disso, as propriedades petrofísicas do modelo são favoráveis para a aplicação da configuração *five-spot*<sup>4</sup> para efetuar uma boa drenagem do campo. Como forma de simplificar o problema, apenas poços verticais são utilizados nesta metodologia.

As condições de operação dos poços produtores foram: vazão máxima de produção de líquido em 900 m<sup>3</sup>/dia, a pressão mínima de fundo de poço em 1x10<sup>6</sup> Pa, o fechamento do poço ocorria quando o corte de água atingisse 90% e quando a produção de óleo fosse menor que 10 m<sup>3</sup>/dia. Para os poços injetores, a máxima vazão de água injetada foi limitada a 900 m<sup>3</sup>/dia e a máxima pressão de fundo de poço estabelecida em 4,1 x10<sup>7</sup> Pa. Além disso, as completações dos poços produtores foram feitas nas três camadas superiores e dos poços injetores nas três inferiores dos modelos.

#### **5.5 Parâmetros Econômicos**

Os parâmetros econômicos necessários para o cálculo do VPL do campo estão descritos na Tabela 5.3.

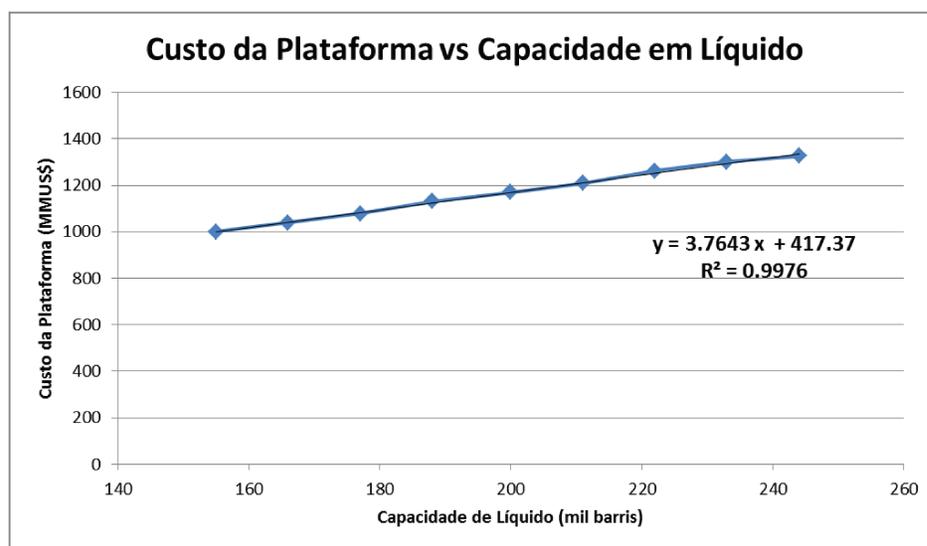
---

<sup>4</sup> Configuração composta de quatro poços produtores dispostos em forma de um quadrado e um poço injetor no meio deste quadrado.

**Tabela 5.3.** Parâmetros utilizados na análise econômica dos modelos.

<i>Variável</i>	<i>Valores</i>
<i>Taxa de Atratividade</i>	10% a.a
<i>Preço de Venda do Óleo</i>	40,00 (US\$/barril)
<i>Preço de Venda do Gás</i>	7,5 (US\$/MMBTU)
<i>Fator de conversão</i>	0,00594 (MMBTU/barril)
<i>PIS / COFINS</i>	9,25%
<i>Imposto de Renda + Contribuição Social</i>	34,0%
<i>Royalties</i>	10,0%
<i>Fator de multiplicação do tipo do óleo produzido no campo</i>	1,0 (Brent)
<i>Investimento inicial</i>	300 milhões (US\$)
<i>Custo de Produção de Óleo</i>	6,8 (US\$/barril)
<i>Custo de Produção de Água</i>	1,0 (US\$/barril)
<i>Custo de Produção de Gás</i>	0,0029 (US\$/barril)
<i>Custo de Injeção de Água</i>	2,0 (US\$/barril)
<i>Investimento - Poços Produtores</i>	30 milhões (US\$)
<i>Investimento - Poços Injetores</i>	30 milhões (US\$)

O investimento na plataforma de produção foi baseado nos preços propostos por Hayashi (2006) em função da capacidade de produção de líquido, corrigido para valores atuais<sup>5</sup>, conforme a Figura 5.4, onde x = capacidade de produção da plataforma (mil bbl óleo/dia); y = custo da plataforma (US\$ milhões):



**Figura 5.4.** Custo da plataforma em função da capacidade de produção de líquido.

<sup>5</sup> Acrescidos em 30% pela atualização de preços.

## **5.6 Tipo de Informação Utilizada no Trabalho**

Na análise de incerteza e risco é importante definir o tipo de informação a ser utilizado no projeto, o que altera a árvore de decisão e os cálculos relativos ao  $VME_{CI}$ . Neste trabalho considera-se a informação obtida como completa e perfeita, ou seja, possui absoluta confiabilidade e elimina totalmente a incerteza com relação aos atributos incertos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, é apresentada a aplicação da metodologia proposta e seus respectivos resultados, a partir de dois exemplos estudados. No primeiro exemplo, pela simplicidade do caso e por haver poucas ramificações na árvore de decisão, não é preciso contemplar plenamente a quantificação do VDI proposta por Xavier (2004). Deste modo, aplica-se apenas a metodologia de otimização e seleção da estratégia de produção com flexibilidade proposta por este trabalho como forma de testá-la e validá-la. No segundo exemplo, a metodologia de quantificação do VDI é aplicada de forma integral, com a seleção de modelos representativos para posterior emprego do método da árvore completa.

### 6.1 Exemplo I

Neste exemplo, a incerteza é localizada em apenas um atributo: a área e, conseqüentemente, o volume de óleo originalmente *in situ* (VOOIS). Admite-se que a probabilidade de ocorrência de cada um destes modelos segue uma distribuição triangular, admitida inicialmente como sendo de 20% para os casos pessimista e otimista e 60% para o caso provável, conforme a Tabela 5.2.

Uma análise foi realizada para constatar se a informação a ser obtida para eliminar a dúvida quanto à área do reservatório seria justificável financeiramente. Portanto, o problema teve o seguinte enfoque:

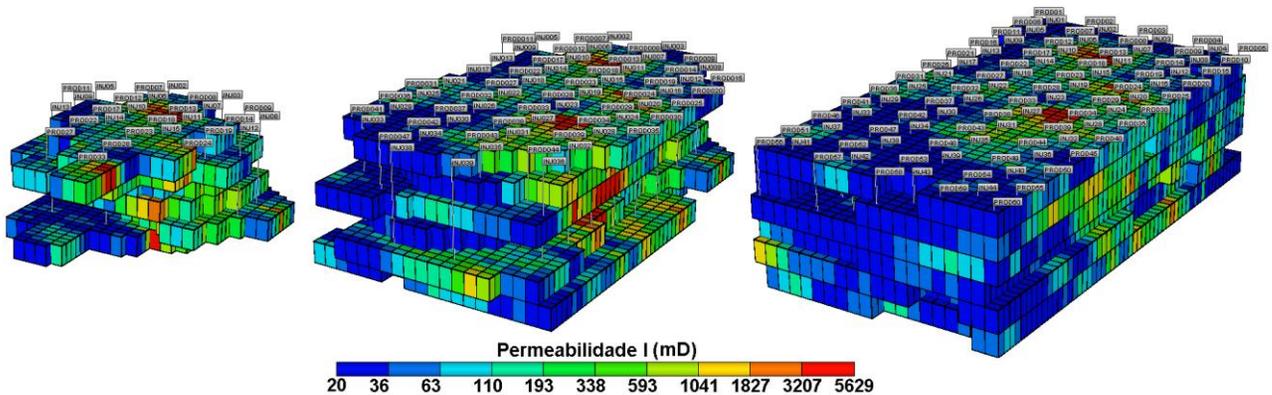
1. Obter informação sobre a área através da perfuração de um poço e com isso definir uma estratégia de produção determinística para os modelos pessimista, provável e otimista.
2. Não obter informação e definir uma estratégia flexível para os modelos pessimista, provável e otimista, baseada nas estratégias determinísticas obtidas com informação.

### 6.1.1 Seleção das Estratégias de Produção Determinísticas

No início da seleção das estratégias determinísticas de produção, configuram-se os arquivos de entrada de simulação e definem-se os parâmetros operacionais e econômicos do campo. O próximo passo consiste no preenchimento completo das malhas de simulação por poços segundo a configuração *five-spot*, feito da seguinte maneira:

- Todos os modelos foram preenchidos inicialmente com a configuração de poços do modelo otimista;
- Os poços e completações que ficaram alocados fora dos limites do reservatório foram excluídos, para evitar erros quando o modelo for simulado.

Ao final desta preparação, o modelo pessimista possui uma quantidade inicial de 29 poços, o modelo provável possui 70 poços e o modelo otimista possui 104 poços, como mostra a Figura 6.1.



**Figura 6.1.** Modelos estruturais pessimista, provável e otimista e suas estratégias iniciais com 29, 70 e 104 poços, respectivamente.

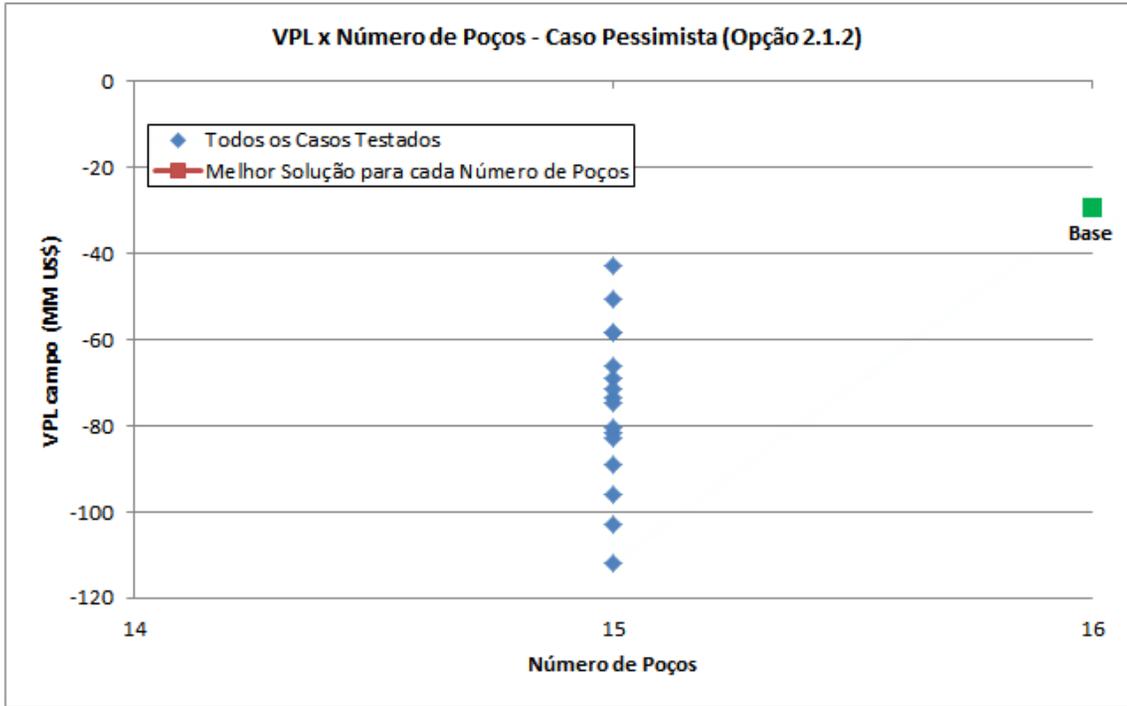
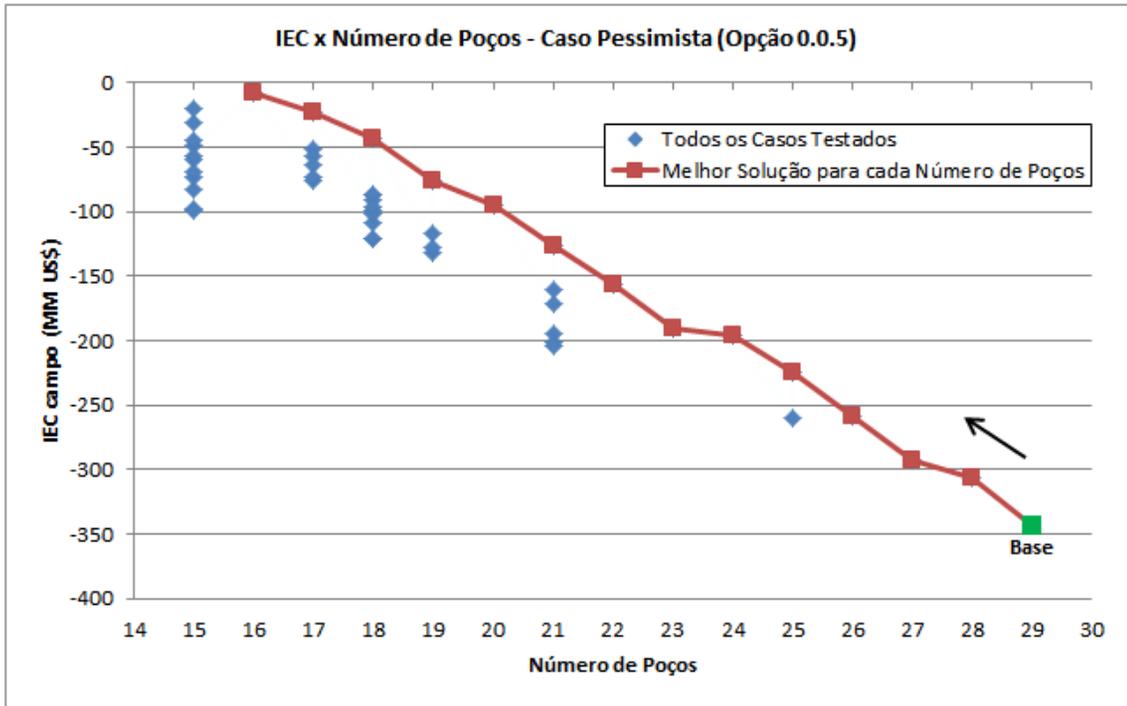
Após a configuração dos arquivos de entrada são feitas as simulações sem e com cronograma para todos os modelos estruturais. A Tabela 6.1 mostra os resultados da otimização de estratégia de produção para o modelo pessimista: número de poços, valores de IEC e VPL, capacidade e custo da plataforma de produção e o número de simulações em cada rodada de simulação.

**Tabela 6.1.** Valores obtidos nas simulações para o modelo pessimista.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
<i>Caso Pessimista 0.0.5</i>	<i>Início</i>	29	16	13	-342.87	90.6	758	48
	<i>Fim</i>	16	8	8	-8.50	45.3	588	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
<i>Caso Pessimista 1.1.1</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-62.36	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-62.36	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.1.2</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-58.92	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-58.92	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.1.3</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-58.74	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-58.74	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.1.4</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-63.74	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-63.74	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.2.1</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-63.4	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-63.39	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.2.2</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-62.06	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-62.06	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.2.3</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-61.14	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-61.14	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 1.2.4</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-64.37	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-64.37	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 2.1.1</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-30.76	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-30.76	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 2.1.2</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-29.35	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-29.35	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 2.1.3</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-29.41	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-29.41	45.3	588	
<i>Caso Pessimista 2.1.4</i>	<i>Início</i>	16	8	8	-30.86	45.3	588	17
	<i>Fim</i>	16	8	8	-30.86	45.3	588	

Na primeira aplicação do algoritmo todos os poços do modelo pessimista foram testados, resultando na exclusão de oito poços produtores de pior IEPP e cinco poços injetores com pior IEPI, chegando ao máximo valor do IEC. Na reaplicação do algoritmo, dentre as doze opções de cronograma disponíveis, a configuração 2.1.2 - que consiste na perfuração de dois produtores e um injetor mensalmente, partindo da abertura de poços produtores e injetores de pior desempenho para os de melhor desempenho - maximizou o VPL do campo e foi selecionada como a melhor alternativa. Observa-se nas configurações de cronograma 2.1 que o número de poços permaneceu igual em todos os modelos, sendo as opções de abertura dos poços segundo o desempenho que determinou o retorno máximo do VPL do campo.

A Figura 6.2 mostra no alto a evolução da curva de IEC na primeira rodada do algoritmo de otimização com a retirada progressiva de poços e abaixo os testes executados na segunda rodada com o cronograma 2.1.2, sem a retirada de nenhum poço. Em vermelho, os poços que foram retirados e em azul aqueles que foram testados sem aumento na função-objetivo.



**Figura 6.2.** Acima, a evolução do IEC com a retirada de poços na opção 0.0.5 para o caso pessimista, onde os poços são abertos simultaneamente. Abaixo, a configuração 2.1.2 que maximizou o VPL do campo.

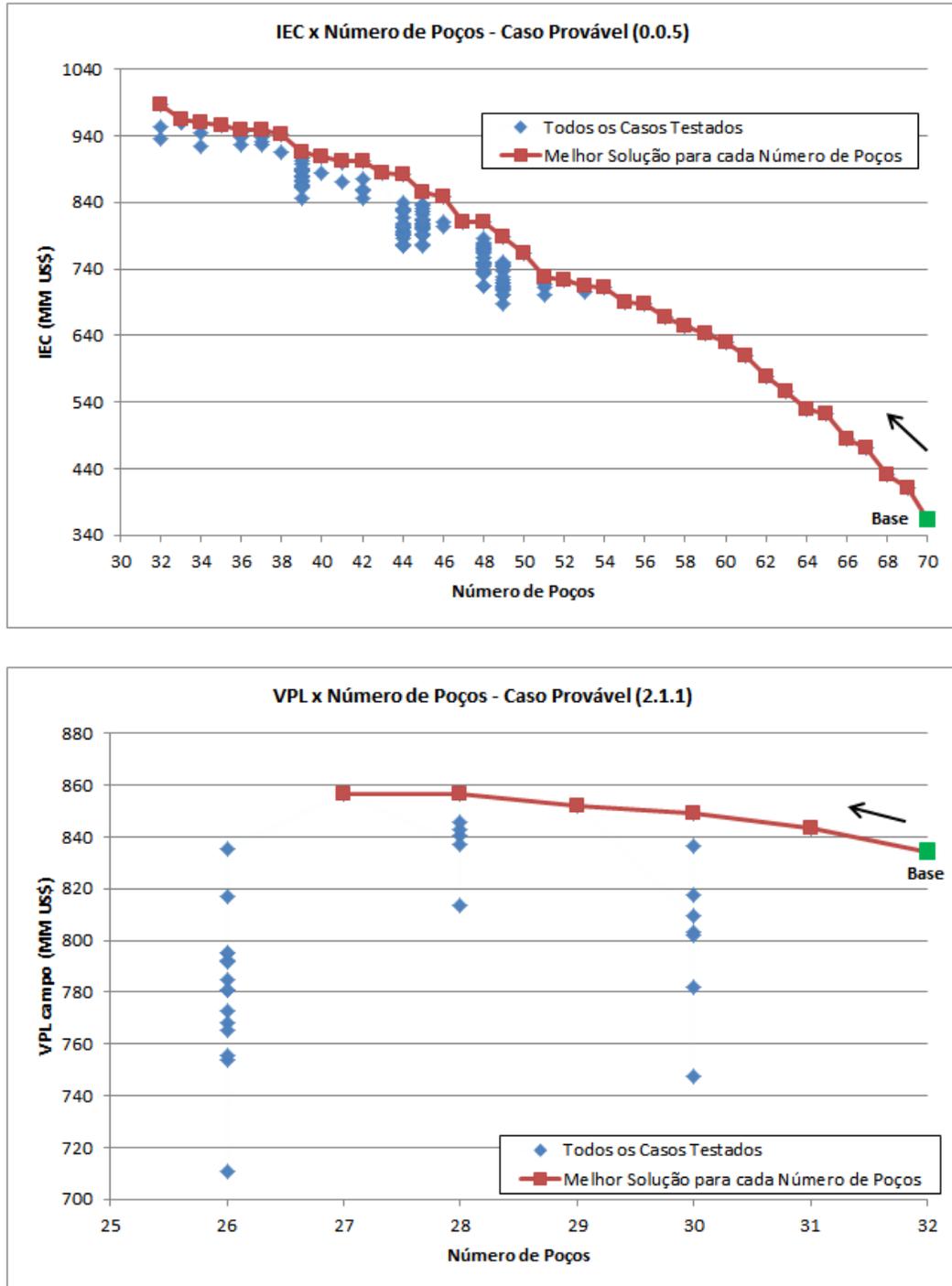
O mesmo procedimento de otimização e seleção de estratégia mostrado anteriormente é aplicado no modelo provável. A Tabela 6.2 mostra os resultados da otimização de estratégia de produção para esse modelo.

**Tabela 6.2.** Valores obtidos nas simulações para o modelo provável.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
Caso Provável 0.0.5	Início	70	34	36	364	192.5	1142	179
	Fim	32	17	15	987	96.2	780	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
Caso Provável 1.1.1	Início	32	17	15	715	96.2	780	34
	Fim	28	15	13	742	84.9	737	
Caso Provável 1.1.2	Início	32	17	15	738	96.2	780	33
	Fim	32	17	15	738	96.2	780	
Caso Provável 1.1.3	Início	32	17	15	746	96.2	780	33
	Fim	32	17	15	746	96.2	780	
Caso Provável 1.1.4	Início	32	17	15	708	96.2	780	45
	Fim	26	14	12	745	79.3	716	
Caso Provável 1.2.1	Início	32	17	15	730	96.2	780	35
	Fim	28	15	13	766	84.9	737	
Caso Provável 1.2.2	Início	32	17	15	731	96.2	780	50
	Fim	29	16	13	758	90.6	758	
Caso Provável 1.2.3	Início	32	17	15	738	96.2	780	34
	Fim	30	16	14	767	90.6	758	
Caso Provável 1.2.4	Início	32	17	15	723	96.2	780	50
	Fim	29	16	13	760	90.6	758	
Caso Provável 2.1.1	Início	32	17	15	834	96.2	780	33
	Fim	27	14	13	857	79.3	716	
Caso Provável 2.1.2	Início	32	17	15	853	96.2	780	33
	Fim	32	17	15	853	96.2	780	
Caso Provável 2.1.3	Início	32	17	15	856	96.2	780	33
	Fim	32	17	15	856	96.2	780	
Caso Provável 2.1.4	Início	32	17	15	832	96.2	780	33
	Fim	32	17	15	832	96.2	780	

Na primeira aplicação do algoritmo, todos os poços do modelo provável foram testados resultando na exclusão de 17 poços produtores de pior IEPP e 21 poços injetores com pior IEPI, chegando ao máximo valor do IEC. Na reaplicação do algoritmo no caso provável, a configuração de cronograma 2.1.1 (perfuração de dois produtores e um injetor mensalmente, partindo da abertura de poços produtores e injetores de melhor desempenho para os de pior desempenho primeiramente) maximizou o VPL do campo, sendo escolhida como a melhor alternativa dentre todas as opções. Neste caso, ao contrário do pessimista, a retirada de cinco poços do modelo e do custo destes no investimento do campo teve influência no VPL final do campo.

A Figura 6.3 mostra evolução das curvas de IEC na primeira aplicação do algoritmo e de VPL na reaplicação com a retirada progressiva de poços.



**Figura 6.3.** Acima, a evolução do IEC com a retirada de poços na opção 0.0.5 para o caso provável, onde os poços são abertos simultaneamente. Abaixo, a configuração 2.1.1 que maximizou o VPL do campo.

A Tabela 6.3 mostra os resultados da otimização de estratégia de produção para o modelo otimista.

**Tabela 6.3.** Valores obtidos nas simulações para o modelo otimista.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
Caso Otimista 0.0.5	Início	104	60	44	1281	339.6	1696	507
	Fim	55	29	26	2309	164.2	1035	

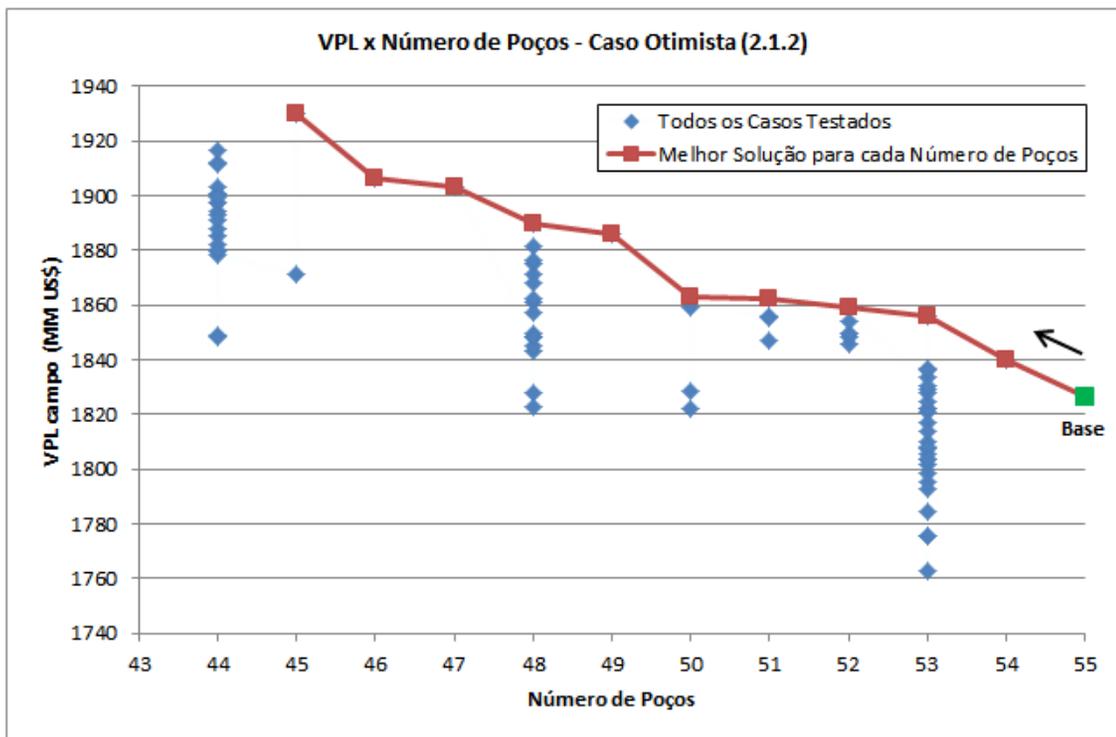
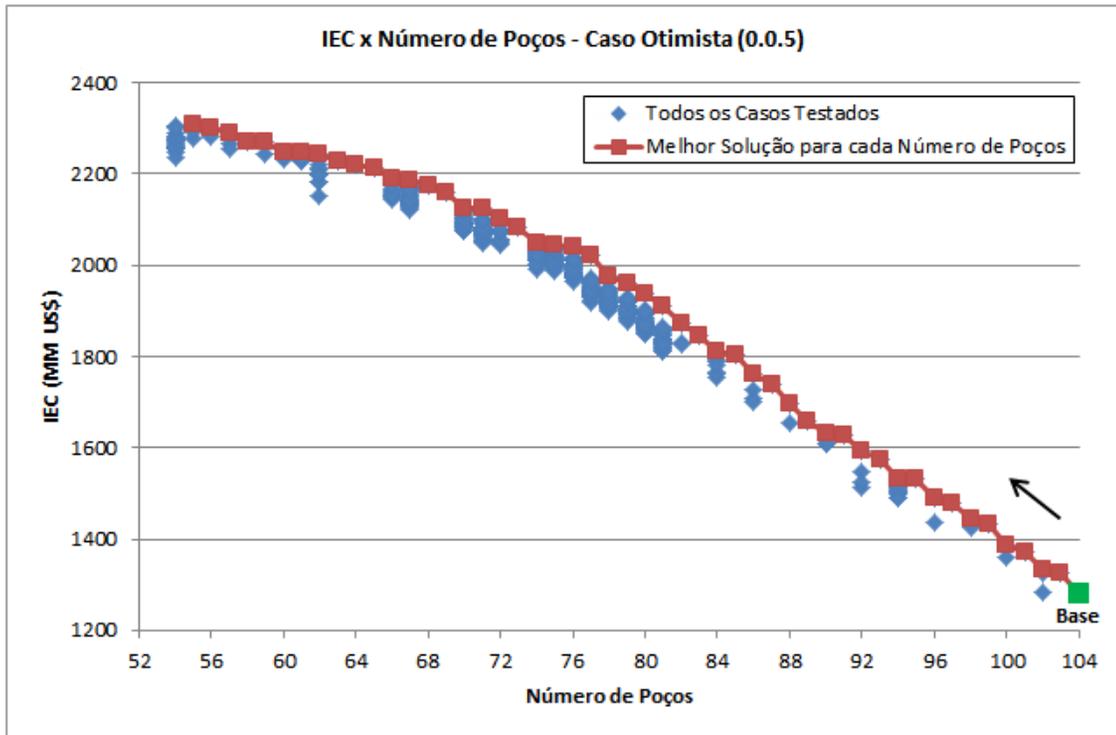
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
Caso Otimista 1.1.1	Início	55	29	26	1564	164.2	1035	56
	Fim	45	24	21	1626	135.9	929	
Caso Otimista 1.1.2	Início	55	29	26	1587	164.2	1035	56
	Fim	55	29	26	1587	164.2	1035	
Caso Otimista 1.1.3	Início	55	29	26	1602	164.2	1035	56
	Fim	55	29	26	1602	164.2	1035	
Caso Otimista 1.1.4	Início	55	29	26	1531	164.2	1035	56
	Fim	49	26	23	1555	147.2	971	

Caso Otimista 1.2.1	Início	55	29	26	1598	164.2	1035	57
	Fim	51	27	24	1634	152.8	993	
Caso Otimista 1.2.2	Início	55	29	26	1601	164.2	1035	83
	Fim	49	26	23	1630	147.2	971	
Caso Otimista 1.2.3	Início	55	29	26	1620	164.2	1035	56
	Fim	55	29	26	1620	164.2	1035	
Caso Otimista 1.2.4	Início	55	29	26	1583	164.2	1035	105
	Fim	46	25	21	1647	141.5	950	

Caso Otimista 2.1.1	Início	55	29	26	1835	164.2	1035	88
	Fim	49	25	24	1891	141.5	950	
Caso Otimista 2.1.2	Início	55	29	26	1827	164.2	1035	84
	Fim	45	23	22	1930	130.2	907	
Caso Otimista 2.1.3	Início	55	29	26	1813	164.2	1035	83
	Fim	49	25	24	1898	141.5	950	
Caso Otimista 2.1.4	Início	55	29	26	1824	164.2	1035	82
	Fim	45	23	22	1909	130.2	907	

Na primeira aplicação do algoritmo, todos os poços do modelo otimista foram testados resultando na exclusão de 31 poços produtores de pior IEPP e 18 poços injetores com pior IEPI, chegando ao máximo valor do IEC. No caso otimista, a configuração de cronograma 2.1.2 (perfuração de dois produtores e um injetor mensalmente, partindo da abertura de poços produtores e injetores de pior desempenho para os de melhor desempenho primeiramente) é aquela que maximiza o VPL do campo, sendo escolhida como a melhor alternativa dentre todas as opções. No caso otimista, novamente, a abertura dos poços segundo o desempenho definiu o máximo VPL do campo, já que a quantidade final de poços entre as duas melhores opções ficaram iguais.

A Figura 6.4 mostra evolução das curvas de IEC na primeira aplicação do algoritmo e de VPL na reaplicação com a retirada progressiva de poços.



**Figura 6.4.** Acima, o gráfico mostra a evolução do IEC com a retirada de poços na opção 0.0.5 para o caso otimista, onde os poços são abertos simultaneamente. Abaixo, a configuração 2.1.2 que maximizou o VPL do campo.

A Tabela 6.4 a seguir mostra o total de simulações e poços em cada uma das estratégias determinísticas definidas para os modelos estruturais pessimista, provável e otimista.

**Tabela 6.4.** Número total de simulações e poços em cada modelo estrutural.

<i>Modelo Estrutural</i>	<i>Número de Total de Simulações</i>	<i>Estratégia Otimizada</i>
<b><i>Pessimista</i></b>	252	16 poços (8p-8i)
<b><i>Provável</i></b>	625	27 poços (14p-13i)
<b><i>Otimista</i></b>	1369	45 poços (23p-22i)

A identificação das estratégias determinísticas é importante para facilitar a visualização destas na árvore de decisão. Deste modo, utiliza-se a denominação E16-P para o modelo pessimista, E27-M para o modelo provável e E45-O para o modelo otimista.

O valor monetário esperado de cada estratégia corresponde ao VPL calculado nos casos pessimista, provável e otimista, multiplicados pelas respectivas probabilidades de ocorrência. De acordo com a Equação 3.3, o  $VME_{CI}$  é um valor único, composto pela somatória dos VME máximos de cada estratégia, portanto:

$$VME_{CI}(MM\ US\$) = -29,35 \cdot 0,2 + 857 \cdot 0,6 + 1930 \cdot 0,2$$

$$VME_{CI} = US\$ 894,33\ MM \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

### 6.1.2 Seleção da Estratégia Probabilística de Produção

Nesta etapa, as estratégias determinísticas são permutadas nos demais modelos estruturais. Em alguns modelos, há a necessidade de excluir os poços que são externos ao reservatório e ajustar o número de poços secos, dependendo de qual modelo estrutural analisado (conforme a Tabela 5.1).

A estratégia E16-P foi inserida nos modelos provável sem a necessidade de corte de poços e apenas um poço seco foi inserido para corrigir o VPL deste modelo. No modelo otimista, a estratégia foi inserida sem cortes e sem adição de poço seco. Desta forma, a estratégia permaneceu a mesma para o modelo provável, chamada de E17-M, e para o modelo otimista denominada de E16-O.

A estratégia E27-M foi inserida nos modelos pessimista e otimista. No modelo pessimista, 13 poços ficaram localizados em regiões externas ao reservatório e foram excluídos, resultando

em uma estratégia com 14 poços. Dois poços secos foram adicionados para ajustar o modelo pessimista, totalizando assim 16 poços. Na árvore de decisão essa estratégia é denominada E16-P, no entanto, é preciso atenção para não confundir essa estratégia com a determinística encontrada para o modelo estrutural, já que o número de poços é igual. No modelo otimista não houve a necessidade de ajuste do número de poços da estratégia e ficou denominada E27-O.

A estratégia E45-O foi inserida nos modelos pessimista e provável, necessitando excluir poços secos em ambos os modelos estruturais. No modelo pessimista, após a retirada dos poços restaram 17 poços. Dois poços secos foram adicionados para ajustar o modelo pessimista, totalizando assim 19 poços. Na árvore de decisão essa estratégia é denominada E19-P. No modelo provável, a redução resultou em uma estratégia final com 36 poços. Um poço seco foi adicionado ao modelo e o custo adicionado ao fluxo de caixa do projeto.

A Tabela 6.5 mostra como ficaram as estratégias após a permutação destas entre os modelos estruturais. As estratégias que tiveram flexibilidade operacional foram a E27-P, E45-P e E45-M, na qual tiveram sua quantidade de poços reduzida para 16, 19 e 37 poços, respectivamente, já incluídos os poços secos. Uma nomenclatura diferenciada para a composição da matriz de dados e outra para a árvore de decisão é feita para ilustrar as estratégias flexíveis adotadas na quantificação do VDI.

**Tabela 6.5.** Estratégias de produção após a permutação entre os modelos estruturais.

<i>Estratégia Determinística</i>	<i>Modelo Estrutural</i>	<i>Nomenclatura Matriz de Dados</i>	<i>Poços Excluídos</i>	<i>Poços Secos Adicionados</i>	<i>Estratégia Probabilística</i>	<i>Nomenclatura Árvore de Decisão</i>
Pessimista 17 poços (9p-8i)	Provável	E17-M	0	1	16 poços (8p-8i)	E17-M
	Otimista	E16-O	0	0	16 poços (8p-8i)	E16-O
Provável 27 poços (14p-13i)	Pessimista	E27-P	13	2	16 poços (10p-6i)	E16-P
	Otimista	E27-O	0	0	27 poços (14p-13i)	E27-O
Otimista 45 poços (23p-22i)	Pessimista	E45-P	28	2	19 poços (11p-8i)	E19-P
	Provável	E45-M	9	1	37 poços (20p-17i)	E37-M

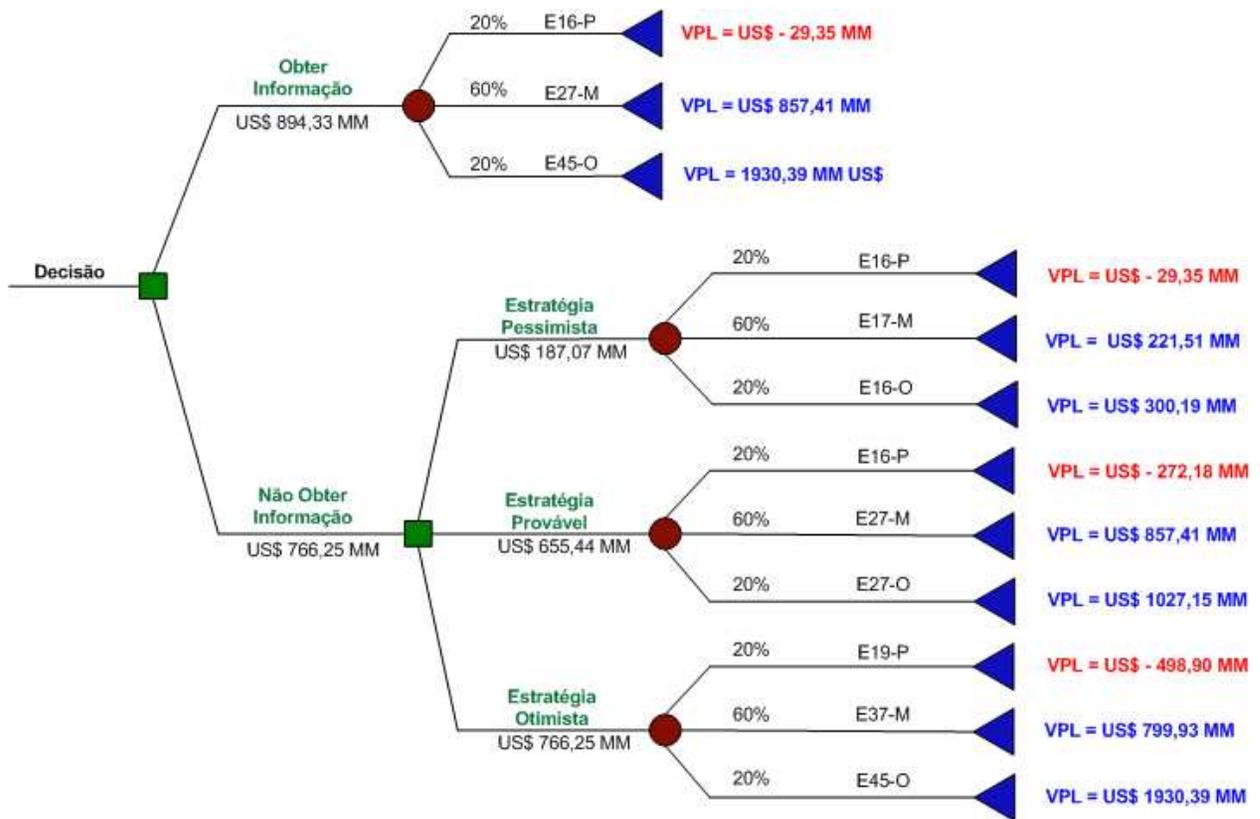
A Tabela 6.6 mostra a matriz de dados com o VPL e a probabilidade de ocorrência de cada modelo e o VME para cada estratégia no caso sem informação.

**Tabela 6.6.** Matriz de dados para o cálculo do VME sem informação.

	<i>Est. Pessimista (E16)(MM US\$)</i>	<i>Est. Provável (E27)(MM US\$)</i>	<i>Est. Otimista (E45)(MM US\$)</i>	<i>Probabilidade</i>
<i>Modelo Pessimista (P)</i>	-29.35	-272.18	-498.90	0.2
<i>Modelo Médio (M)</i>	221.51	857.41	799.93	0.6
<i>Modelo Otimista (O)</i>	300.19	1027.15	1930.39	0.2
<i>VMEsi (MM US\$)</i>	187.07	665.44	766.25	

Dentre todas as estratégias possíveis, o  $VME_{SI}$  corresponde ao máximo VME obtido para o reservatório com uma determinada estratégia, independente se ela é fixa ou variável. Neste caso, a estratégia otimista é escolhida com  $VME_{SI} = \text{US\$ } 766,25$  milhões, maior VME dentre todas as estratégias, conforme a Equação 3.2.

A Figura 6.5 ilustra a árvore de decisão para o primeiro exemplo, onde todas as estratégias determinísticas e probabilísticas estão representadas. As estratégias que sofreram ajuste no número de poços foram as estratégias E27-P, E45-P e E45-M, cujas nomenclaturas passam respectivamente para E16-P, E19-P e E37-M, conforme a Tabela 6.6.



**Figura 6.5.** Árvore de decisão para um atributo incerto: o modelo estrutural.

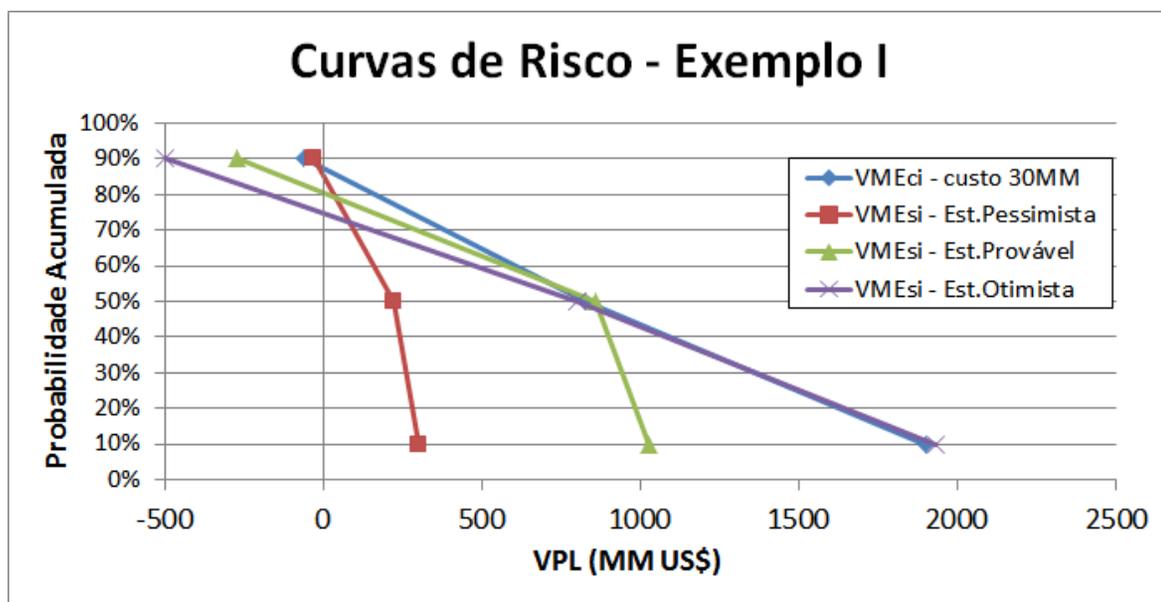
### 6.1.3 Cálculo do VDI

O valor da informação é obtido a partir da subtração do  $VME_{CI}$  e do  $VME_{SI}$ , segundo a Equação 3.1:

$$VDI = VME_{CI} - VME_{SI} = 894,32 - 766,25 = US\$ 128,07 \text{ milhões} \dots\dots\dots (6.2)$$

Em consideração aos valores tradicionais encontrados para o valor da informação, onde o valor do benefício da informação é próximo ao seu custo, o valor final pode ser considerado alto, em torno de quatro vezes maior que o custo de um poço. O elevado valor da informação pode ser atribuído à estratégia de produção flexível, que retirou grande parte dos poços secos que antes eram inseridos na quantificação. O custo dos poços pode ser insignificante para a análise de decisão, mas decisivos para o VDI, que consiste em uma diferença entre VME.

As curvas de risco para o exemplo são compostas considerando o  $VME_{CI}$  decrescido do seu custo da informação (neste caso, a perfuração de um poço estimado em US\$ 30 milhões), obtendo assim a curva em azul, como mostra a Figura 6.6.



**Figura 6.6.** Curva de risco do projeto (Exemplo I).

As curvas em vermelho, roxo e verde representam o caso sem informação e são referentes às estratégias pessimista, provável e otimista, respectivamente. Nota-se que a estratégia pessimista possui o menor risco, haja vista a pequena dispersão no eixo das abscissas, porém com baixo retorno financeiro. Optando-se pela estratégia média, o risco é moderado (com possibilidades de eventuais perdas, caso o modelo se mostre otimista) e ganhos razoáveis. A estratégia otimista possui a maior dispersão dentre as curvas; no entanto, oferece boa

lucratividade em modelos prováveis e ganhos significativos em modelos otimistas, sendo escolhida como a melhor estratégia a ser seguida, mostrada através do cálculo do VME.

## **6.2 Exemplo II**

Este exemplo é conduzido integralmente conforme a metodologia de quantificação do VDI proposta por Xavier (2004) com as alterações propostas por este trabalho, no que se refere aos cálculos do  $VME_{CI}$ ,  $VME_{SI}$  e incorporação de flexibilidade operacional com relação ao número de poços nos diferentes modelos estruturais.

Em consequência do processo automatizado de otimização de estratégia é possível aplicar o método da árvore completa e obter os VME para todos os modelos combinados da árvore de decisão, com três abordagens consideradas quanto à compra de informações. Na primeira, o modelo estrutural e a porosidade têm as suas incertezas eliminadas através da adição de informações. Na segunda, a informação obtida através da perfuração do poço elimina completamente a dúvida sobre o modelo estrutural. Na terceira abordagem, todas as dúvidas referentes aos atributos incertos são sanadas com a compra da informação, resultando em uma árvore composta apenas por nós de decisão.

### **6.2.1 Cálculo do VDI – Dois Atributos Passíveis de Redução de Incerteza**

#### **6.2.1.1 Definição das Incertezas**

No exemplo anterior, a única incerteza existente no projeto é com relação ao modelo estrutural do reservatório, que leva a necessidade de seleção de estratégias de exploração para apenas três modelos geológicos incertos e a composição de uma árvore de decisão simples. Neste segundo exemplo, o modelo de simulação possui quatro atributos incertos (modelo estrutural, porosidade, permeabilidade vertical e horizontal) discretizados em três níveis de incerteza (pessimista, provável e otimista), totalizando  $3^4 = 81$  modelos geológicos incertos, como mostra a Tabela 5.2.

### 6.2.1.2 Elaboração e Otimização do Caso Base

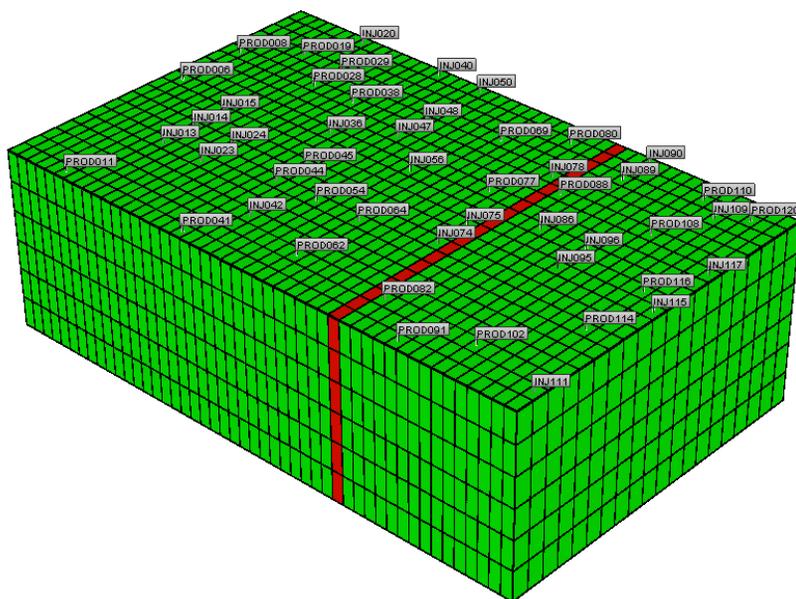
O caso base é o modelo geológico constituído por todos os atributos incertos do projeto com seus valores mais prováveis, ou seja,  $k_{perm} = 0$ . O modelo estrutural provável possui uma barreira de transmissibilidade total que divide o reservatório em duas porções, como mostra a Figura 5.3, e uma configuração *five-spot* inicial de 240 poços, sendo 120 produtores e 120 injetores, distribuídos integralmente em toda a malha de simulação.

O processo de otimização da estratégia aplicado ao caso base e aos demais modelos segue a metodologia automatizada e assistida proposta por este trabalho no Item 4.3, que foi baseada nos trabalhos de Santos (2002) e Mezzomo (2005), citados previamente. A primeira parte do processo consiste na aplicação do algoritmo para a retirada primária dos poços de baixo desempenho e a segunda testa as doze opções de cronograma, visando selecionar aquela que maximiza o valor presente líquido do caso base, conforme a Tabela 6.7.

**Tabela 6.7.** Valores obtidos na otimização do caso base.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
Caso Base 0.0.5	Início	240	120	120	-3043	679.3	2974	543
	Fim	53	28	25	2181	158.5	1014	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
Caso Base 1.1.1	Início	53	28	25	1515	158.5	1014	103
	Fim	49	26	23	1551	147.2	971	
Caso Base 1.1.2	Início	53	28	25	1450	158.5	1014	100
	Fim	46	24	22	1564	135.9	929	
Caso Base 1.1.3	Início	53	28	25	1471	158.5	1014	101
	Fim	45	24	21	1548	135.9	929	
Caso Base 1.1.4	Início	53	28	25	1360	158.5	1014	128
	Fim	48	26	22	1478	147.2	971	
Caso Base 1.2.1	Início	53	28	25	1533	158.5	1014	107
	Fim	53	28	25	1533	158.5	1014	
Caso Base 1.2.2	Início	53	28	25	1488	158.5	1014	103
	Fim	47	25	22	1574	141.5	950	
Caso Base 1.2.3	Início	53	28	25	1539	158.5	1014	107
	Fim	53	28	25	1539	158.5	1014	
Caso Base 1.2.4	Início	53	28	25	1504	158.5	1014	107
	Fim	53	28	25	1504	158.5	1014	
Caso Base 2.1.1	Início	53	28	25	1752	158.5	1014	154
	Fim	50	25	25	1855	141.5	950	
Caso Base 2.1.2	Início	53	28	25	1703	158.5	1014	100
	Fim	44	23	21	1809	130.2	907	
Caso Base 2.1.3	Início	53	28	25	1710	158.5	1014	154
	Fim	50	25	25	1864	141.5	950	
Caso Base 2.1.4	Início	53	28	25	1675	158.5	1014	146
	Fim	46	23	23	1837	130.2	907	

Dentre as opções de cronogramas testadas, a configuração 2.1.3 proporciona o maior retorno para o caso base, sendo escolhida como a melhor estratégia, como mostra a Figura 6.7. Nota-se que a abertura dos poços segundo o desempenho foi decisiva na definição do maior VPL, já que os casos 2.1.2 e 2.1.4 tiveram um menor número de poços que as configurações 2.1.1 e 2.1.3 e mesmo assim não foram suficientes para maximizar o valor presente. Entre as opções 2.1.1 e 2.1.3, que tiveram os maiores VPL e quantidades iguais de poços, a escolha por quais poços perfurar primeiramente possibilitou a escolha da melhor configuração.

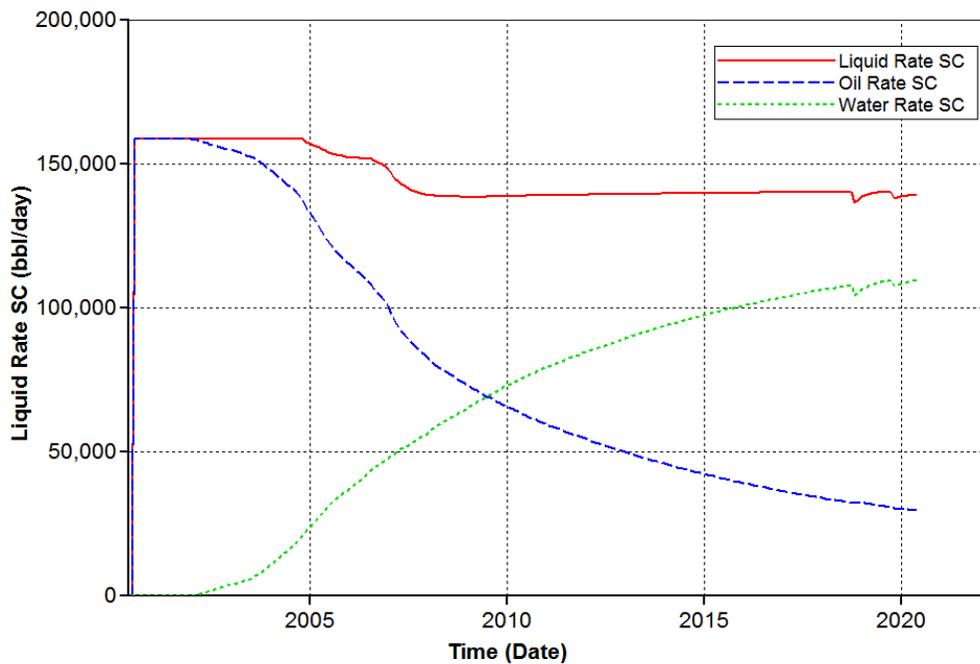


**Figura 6.7.** Estratégia que maximiza o VPL do caso base (mapa de transmissibilidade).

A Figura 6.8 e a Figura 6.9 mostram as curvas de produção de líquido, óleo e água para as opções 0.0.5 e 2.1.3 do cronograma, respectivamente. Na primeira figura, nota-se que, nos cinco primeiros anos, o pico de produção é limitado pela vazão máxima de líquido produzida pelos poços produtores. Após este período, a produção de líquido da plataforma se estabiliza com a queda na produção de óleo e o aumento na produção de água. Vale frisar que a plataforma não opera com uma produção de líquido constante, apenas é limitada a um máximo de vazão de líquido para cada poço produtor.

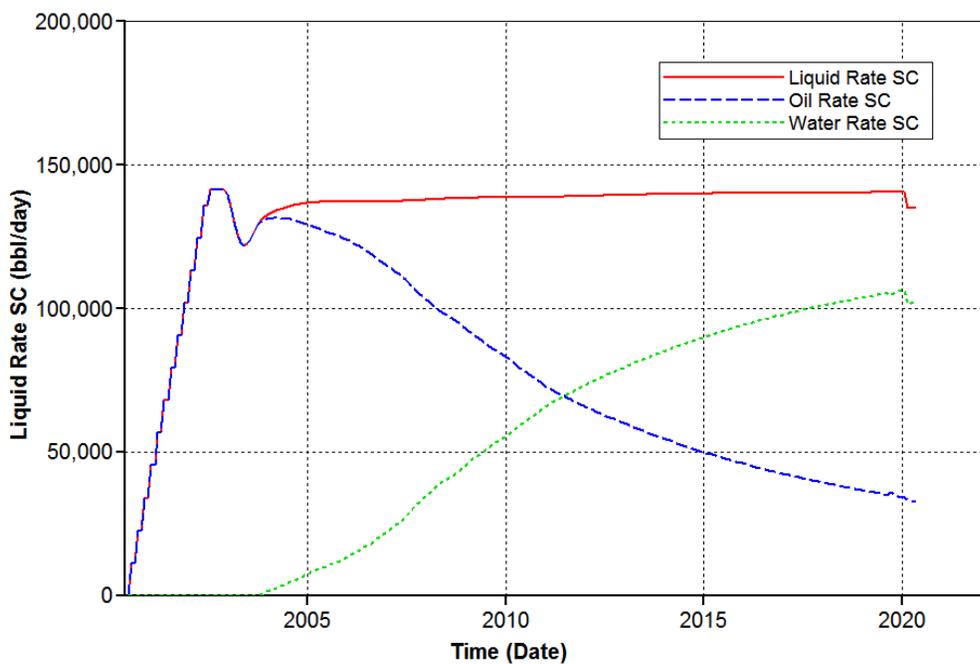
Na segunda figura, com a entrada do cronograma, o pico de produção se ajusta dentro do máximo de vazão de líquido estipulado para os poços produtores desde o início da produção. Além disso, o declínio da produção de óleo no decorrer do tempo é menor e mais gradual com o cronograma que no caso onde a abertura dos poços ocorre de forma simultânea.

Otimização - Caso Base 0.0.5  
**Taxas de Produção (bbl/dia) x Tempo (Anos)**



**Figura 6.8.** Curvas de produção para o caso base – opção 0.0.5.

Otimização - Caso Base 2.1.3  
**Taxas de Produção (bbl/dia) x Tempo (anos)**



**Figura 6.9.** Curvas de produção para o caso base otimizado – opção 2.1.3.

### 6.2.1.3 Análise de Sensibilidade

Nesta etapa, utiliza-se o Módulo de Análise de Incertezas (MAI) do UNIPAR para efetuar a combinação dos níveis dos atributos incertos e preparar os 81 modelos de simulação<sup>6</sup>. A preparação consiste em inserir a estratégia otimizada do caso base em todos os modelos geológicos. Nos modelos geológicos cuja estrutura é pessimista, a estratégia de 50 poços do caso base foi reduzida para 32 poços, devido àqueles que ficaram alocados fora dos limites do reservatório. No entanto, com a retirada de poços, o cronograma proveniente do caso base em cada modelo pessimista se desconfigura, sendo necessário o reajuste manual segundo o cronograma 2.1. Feito isso, a simulação numérica de fluxo é aplicada a todos os modelos considerando os mesmos parâmetros econômicos (incluindo o custo de plataforma) provenientes da otimização do caso base.

A Figura 6.10, Figura 6.11 e a Figura 6.12 mostram a sensibilidade de cada nível com relação às funções-objetivo VPL,  $N_p$  e  $W_p$ , respectivamente.

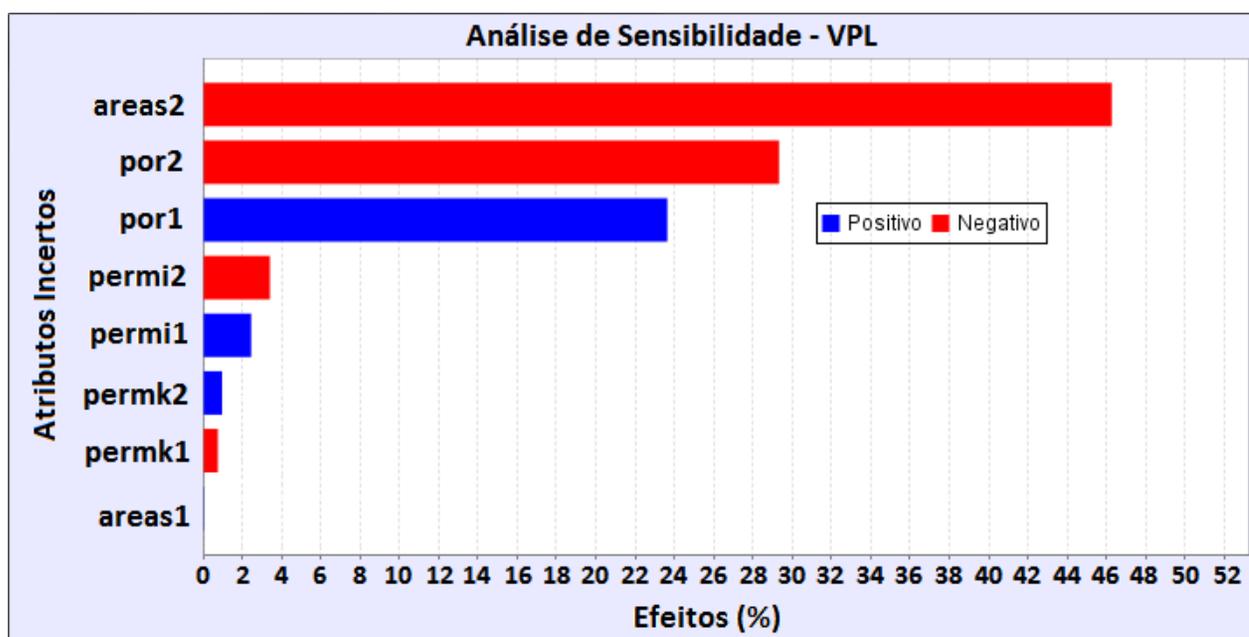
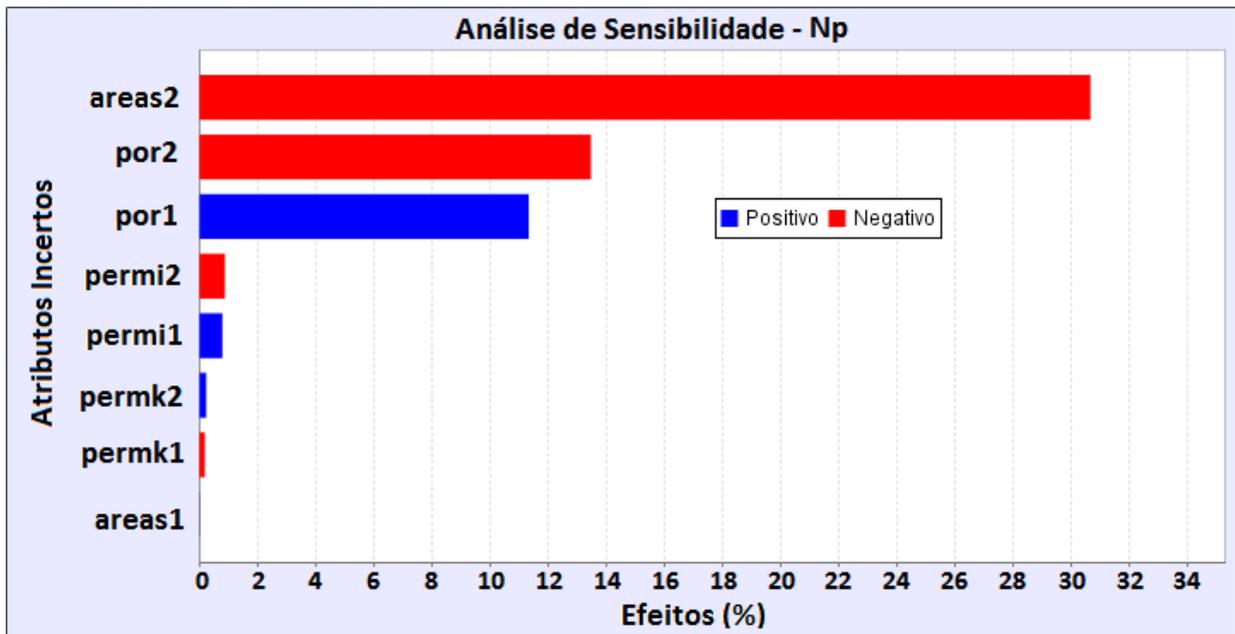
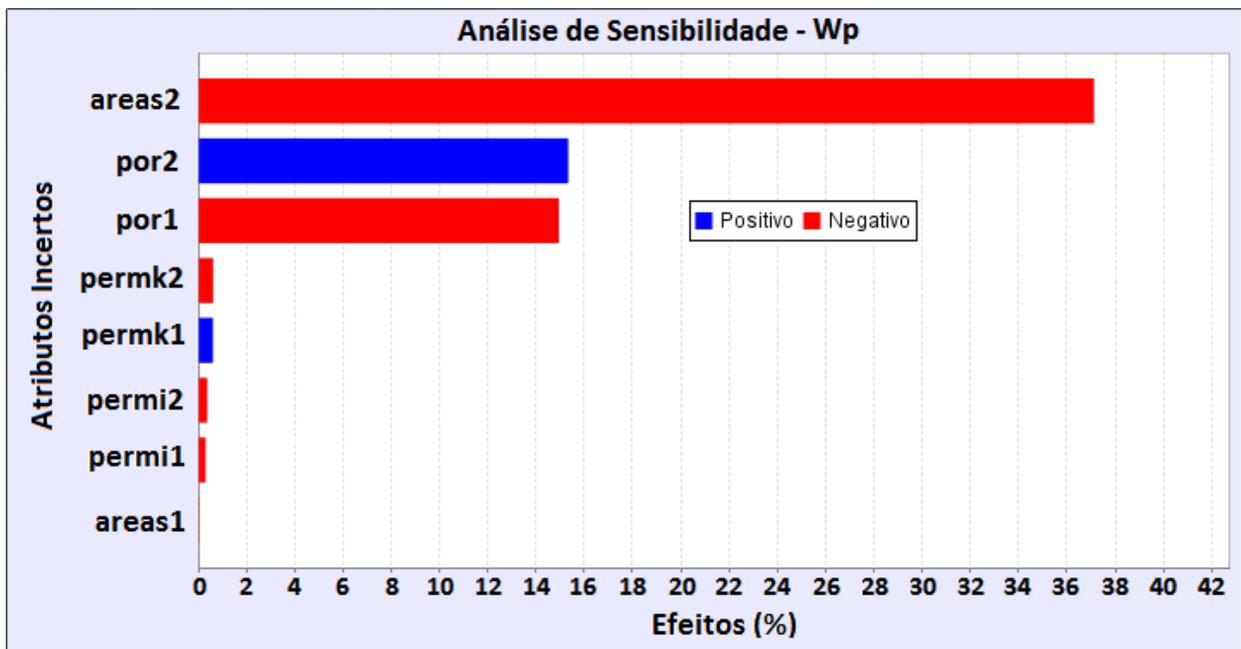


Figura 6.10. Análise de sensibilidade para a função-objetivo VPL (20 anos).

<sup>6</sup> Os arquivos de entrada do MAI devem ser configurados conforme a descrição feita no Anexo I.



**Figura 6.11.** Análise de sensibilidade para a função-objetivo Np (20 anos).



**Figura 6.12.** Análise de sensibilidade para a função-objetivo Wp (20 anos).

Observa-se nos gráficos acima que os atributos críticos mais influentes são os mesmos para todas as funções-objetivo, o modelo estrutural (*areas*) e a porosidade (*por*), apesar das permeabilidades horizontal e vertical terem seus valores acrescidos em 100 mD e 40 mD para esse exemplo. Não houve nenhuma diferenciação na ordem dos atributos em nenhuma das

funções-objetivo que justificasse a inclusão das permeabilidades como atributos críticos na análise.

#### 6.2.1.4 Elaboração da Árvore de Derivação

Como este trabalho emprega o método da árvore completa, isto é, com a combinação entre os níveis de todos os atributos incertos, a árvore de derivação a ser utilizada será composta por  $3^4 = 81$  ramificações, modelos ou cenários possíveis, como mostra a Figura 6.14.

#### 6.2.1.5 Curva de Risco

A Figura 6.13 ilustra a curva de risco do projeto depois da otimização do caso base, juntamente com os seus percentis  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  e  $P_{90}$ . Observa-se que a curva possui “degraus”, o que indica diferenças significativas entre os ramos da árvore de derivação, especialmente com relação à variabilidade do modelo estrutural e da porosidade. Isto é o primeiro indicador que a informação será útil no processo decisório, tendo em vista a diferença pronunciada entre os modelos.

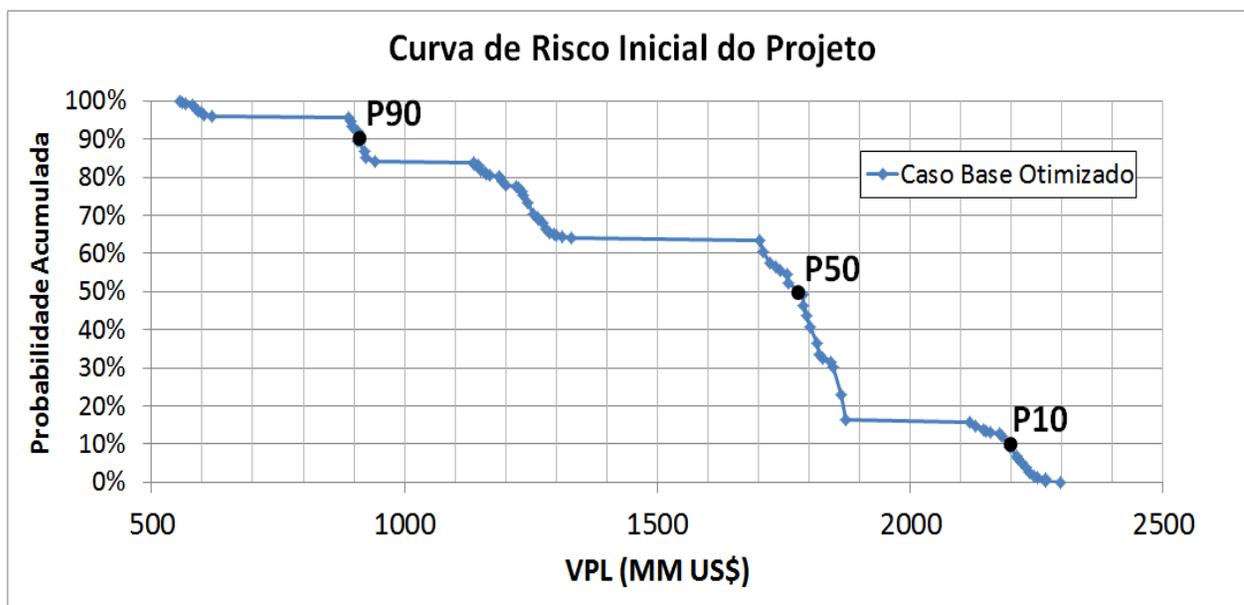


Figura 6.13. Curva de risco do projeto.

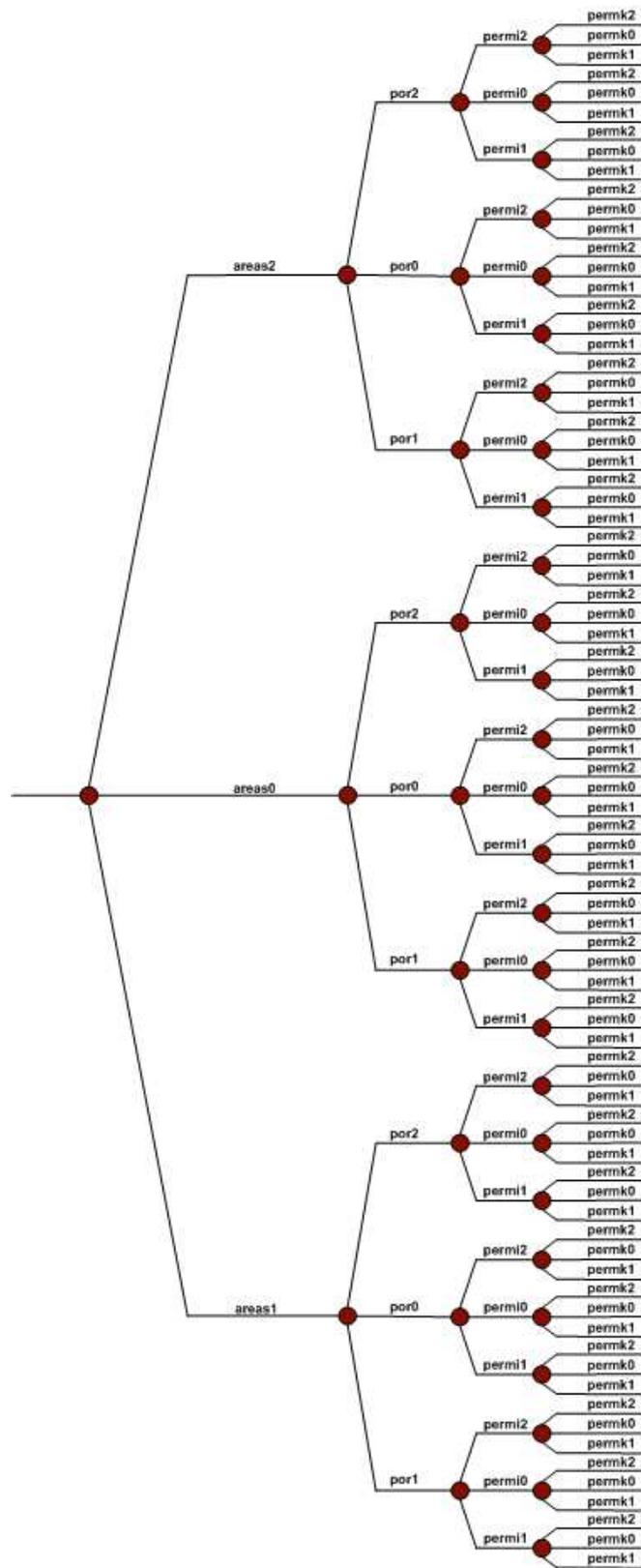


Figura 6.14. Árvore de derivação.

### 6.2.1.6 Aquisição da Informação

Apesar da curva de risco da Figura 6.13 possuir apenas VPL positivos, o que indica a ausência de risco de perda, isso não inviabiliza a aquisição de novas informações ao projeto. A perfuração de poços de desenvolvimento é utilizada como fonte de informação para reduzir as incertezas existentes, especialmente sobre os atributos críticos apontados pela análise de sensibilidade. Deste modo, utilizam-se as informações adicionais provenientes dos poços para mitigar o risco de se obter um retorno menor e deslocar a curva de risco o máximo possível à direita no eixo  $x$ , aumentando a lucratividade do projeto.

### 6.2.1.7 Árvore de Decisão

A transformação da árvore de derivação em árvore de decisão depende de quantos atributos são passíveis de redução de incerteza através da obtenção da informação. A análise de sensibilidade indicou que o modelo estrutural e a porosidade são considerados atributos críticos; ademais, estes podem ter suas incertezas reduzidas através da perfuração de um poço. Deste modo, a compra de informações permite que a árvore de derivação se transforme na árvore de decisão, como mostra a Figura 6.15. A adição das informações ao projeto faz com que a árvore de decisão passe a ter dois nós de decisão e seja subdividida em nove grupos distintos, de maneira que se possa englobar a incerteza agregada às variáveis: modelo estrutural (*areas*) e porosidade (*por*), ambos com três níveis de incerteza.

### 6.2.1.8 Seleção dos Modelos Representativos (MR)

A seleção dos modelos representativos não é uma tarefa simples e consiste em analisar todos os modelos da árvore de decisão, com o objetivo de escolher aqueles que possam representar a variabilidade das estratégias de produção na árvore de decisão. Para selecionar os modelos representativos são gerados seis gráficos combinando duas funções-objetivo por vez:  $VPL \times N_p$ ,  $VPL \times FR_o$ ,  $FR_o \times N_p$ ,  $W_p \times N_p$ ,  $FR_o \times W_p$ ,  $VPL \times W_p$ .

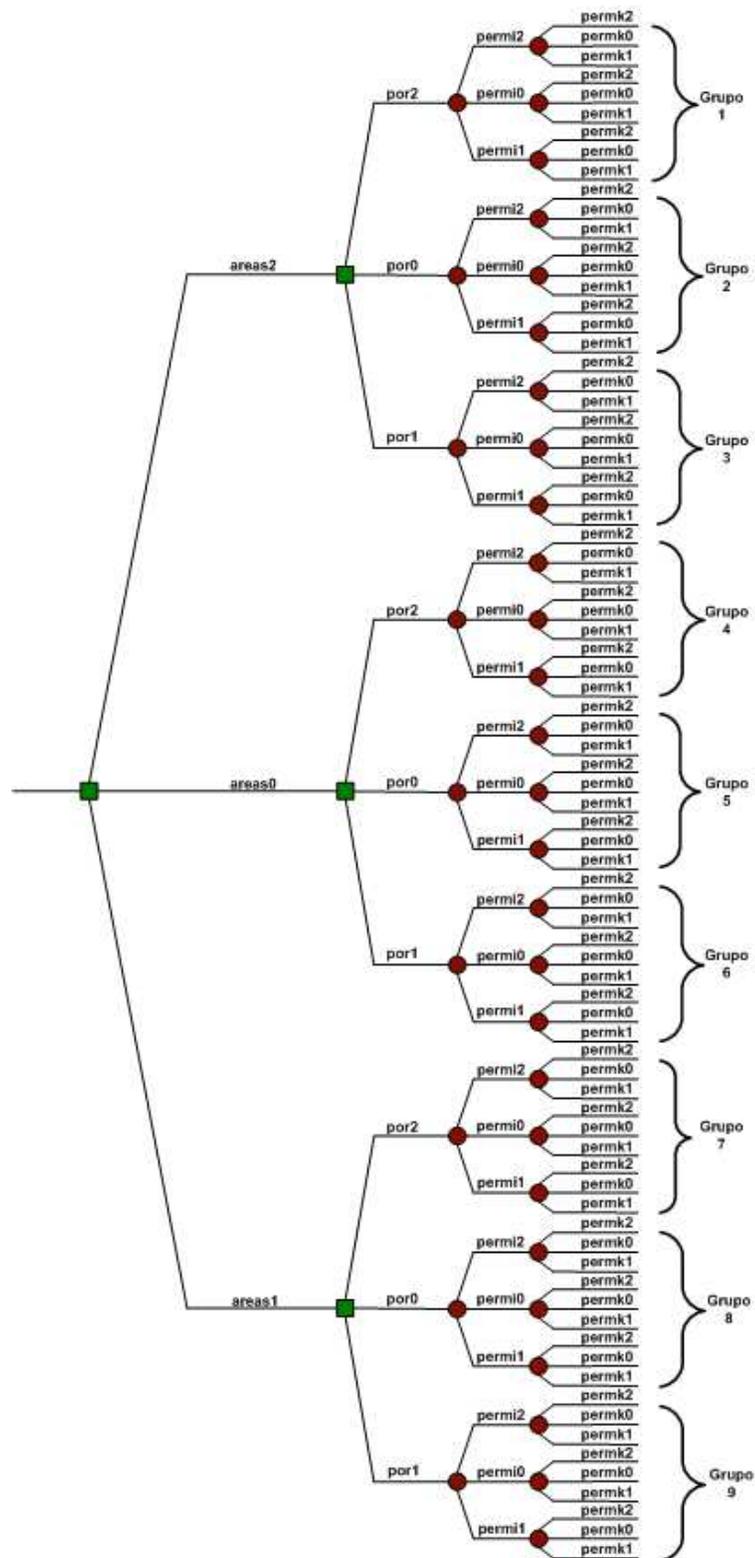
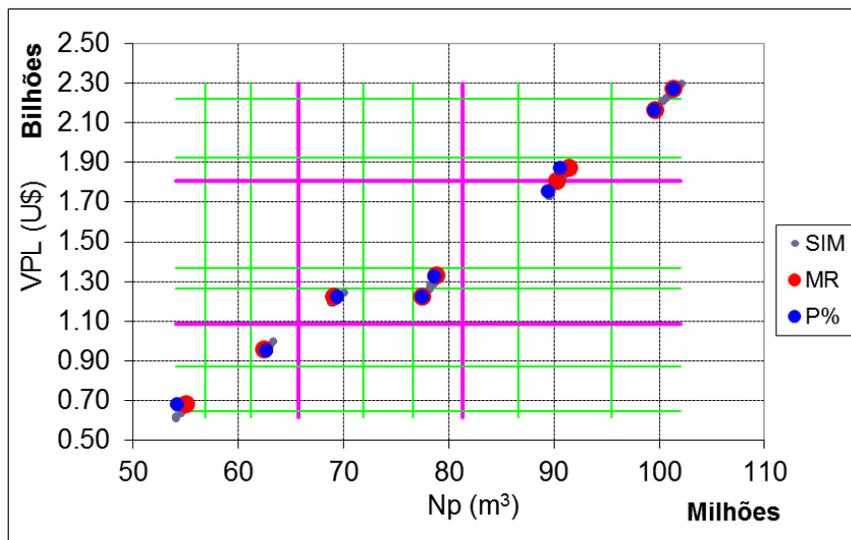
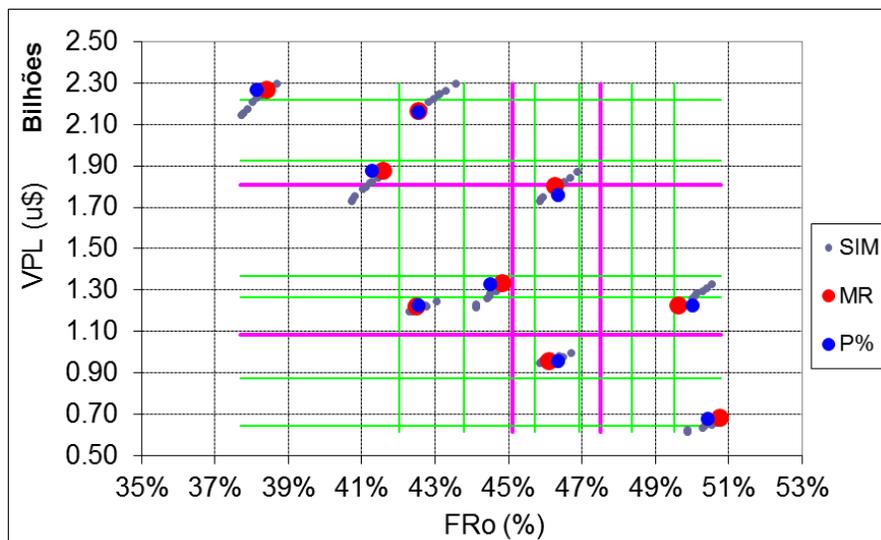


Figura 6.15. Árvore de decisão subdividida em 9 grupos.

Os gráficos são divididos em nove quadrantes principais (linhas rosa) que se subdividem em nove quadrantes secundários (linhas verdes), totalizando 81 quadrantes. O ajuste das linhas dos quadrantes principais e secundários deve ter como referência os percentis, representados pelos pontos azuis ( $P_{10}$ , a  $P_{90}$ ), que devem estar localizados dentro de algum dos quadrantes. A nuvem de pontos em cinza representa os valores provenientes das funções-objetivo analisadas em cada gráfico. Seleccionam-se os MR pela distância dos pontos até os percentis, priorizando os modelos que estão mais próximos destes pontos. A princípio, os gráficos que devem ser analisados para a determinação dos MR são aqueles que envolvem o VPL, já que esta é a função-objetivo principal deste estudo, como mostram a Figura 6.16 e Figura 6.17.

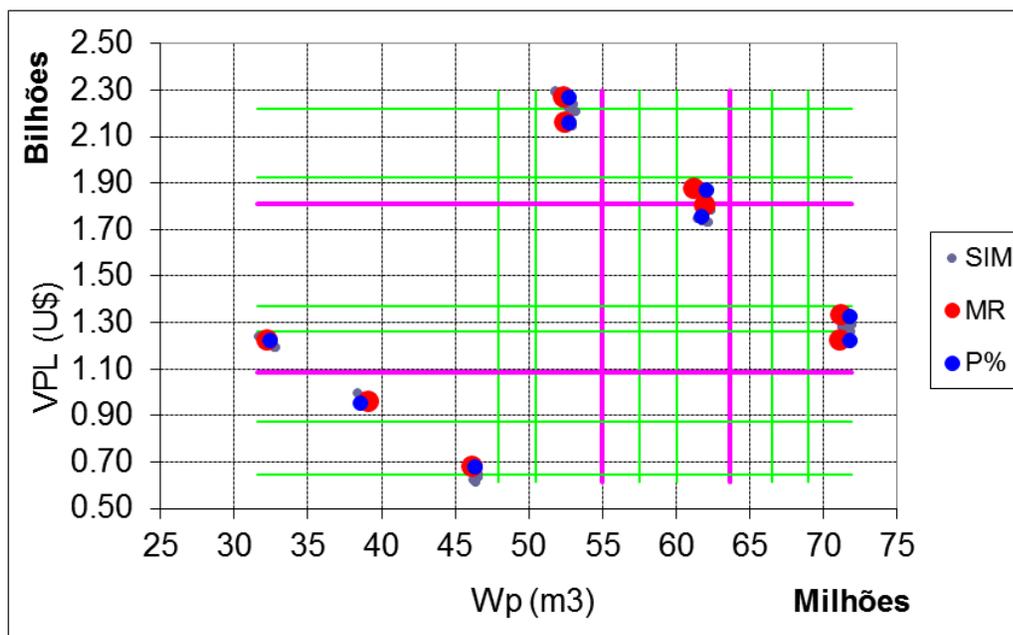


**Figura 6.16.** Modelos representativos em função de VPL e  $N_p$ .



**Figura 6.17.** Modelos representativos em função de VPL e  $FR_o$ .

Na seleção dos MR, é natural que a tendência de ajuste dos modelos representativos seja no sentido de comparar o VPL com funções-objetivo de produção, como o fator de recuperação e o volume de óleo produzido. No entanto, a análise individual destas funções não garante que os modelos representativos estão com boa variabilidade nos níveis dos atributos. O ajuste do VPL com relação ao volume de água produzida é fundamental para verificar se os modelos escolhidos como representativos foram bem selecionados, como ilustra a Figura 6.18.



**Figura 6.18.** Modelos representativos em função de VPL e  $W_p$ .

Os gráficos que relacionam somente as funções-objetivo de produção são mostrados na Figura 6.19, Figura 6.20 e Figura 6.21. Na seleção dos MR, a análise destes gráficos é secundária haja vista a escolha do VPL como função-objetivo principal, porém demonstram que os modelos escolhidos estão bem representados e com ampla variação nos atributos, permitindo que todos os cenários sejam contemplados.

A análise da curva de risco é outro recurso que pode ser utilizado para verificar a variação dos MR escolhidos para cada função-objetivo, conforme a Figura 6.22. Pelos pontos obtidos, em vermelho, há uma boa seleção de pontos em todos os pontos da curva de risco, reiterando a variabilidade da estratégia de produção nos modelos representativos escolhidos.

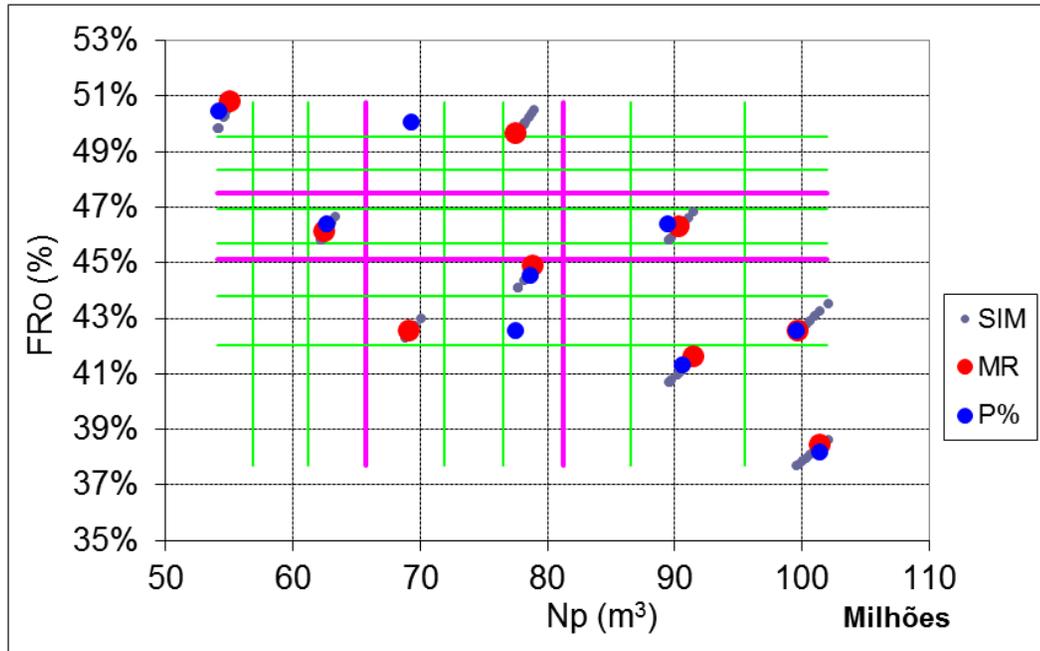


Figura 6.19. Modelos representativos em função de  $FR_o$  e  $N_p$ .

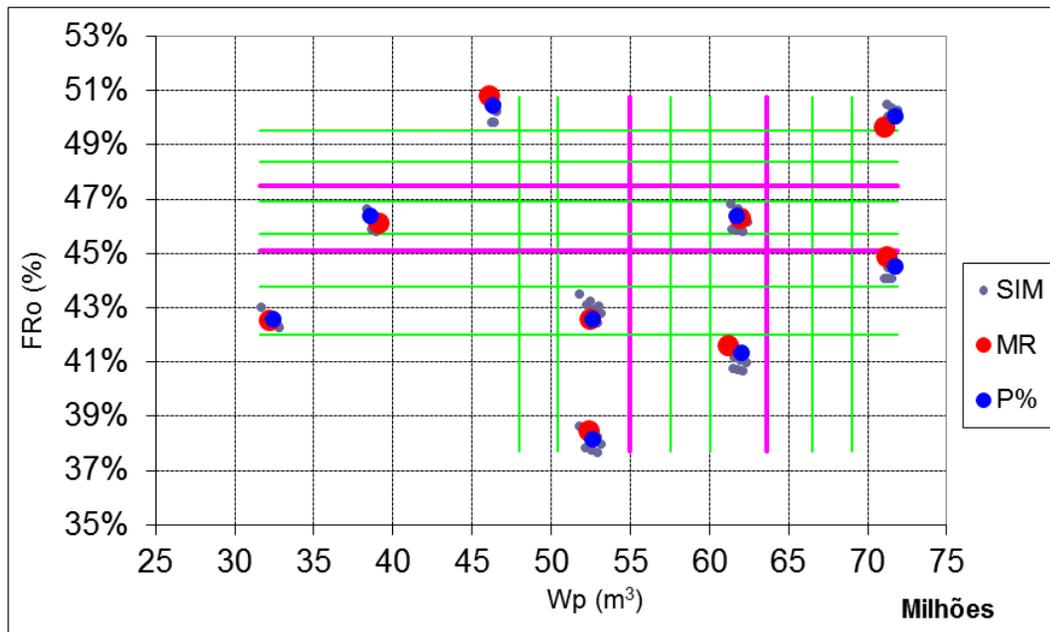
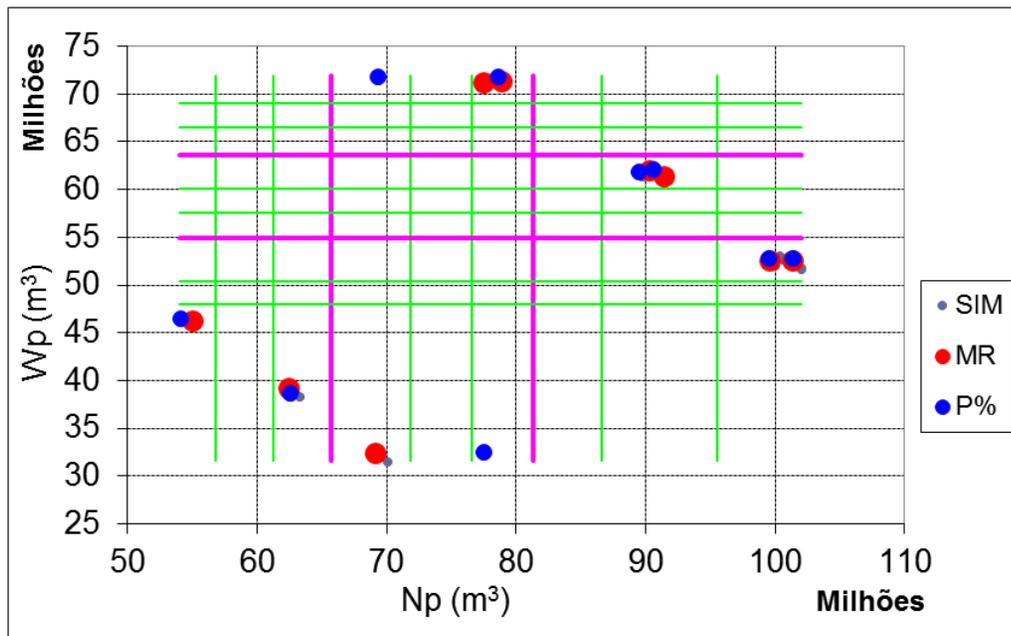
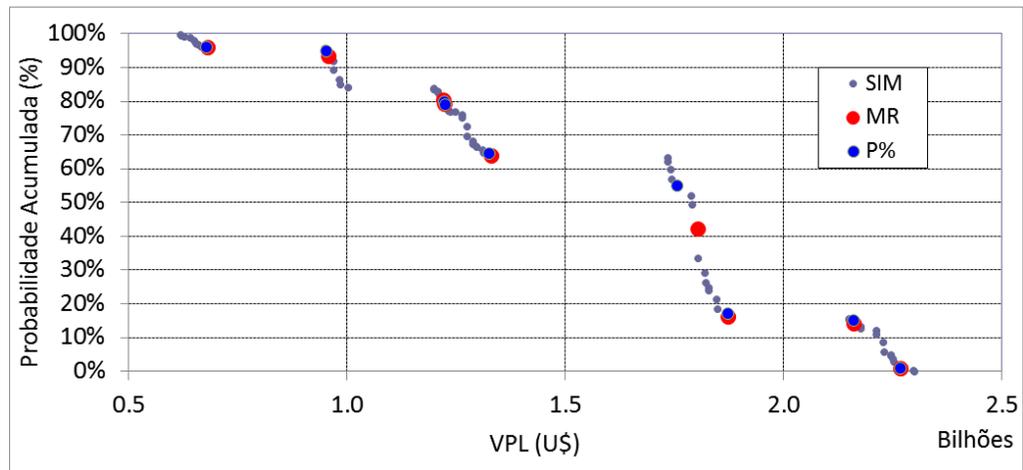


Figura 6.20. Modelos representativos em função de  $FR_o$  e  $W_p$ .



**Figura 6.21.** Modelos representativos em função de  $W_p$  e  $N_p$ .

#### Curva de Risco - Modelos Representativos



**Figura 6.22.** Curva de risco e os nove modelos representativos selecionados.

Os modelos representativos selecionados pela análise dos gráficos combinados das funções-objetivo estão ilustrados na Tabela 6.8. Os números relacionados aos atributos incertos são seus níveis de incerteza, que combinados representam um modelo. Deste modo, o caso base, composto pela combinação dos atributos em seus níveis mais prováveis, é representado por MR0000 e a sua estratégia será representada por E0000.

**Tabela 6.8.** Modelos representativos selecionados.

<i>areas</i>	<i>por</i>	<i>permi</i>	<i>permk</i>
0	0	0	0
0	1	2	0
0	2	2	0
1	1	1	0
1	0	1	2
1	2	1	2
2	0	0	1
2	1	2	2
2	2	1	2

#### **6.2.1.9 Seleção das Estratégias de Produção Determinísticas dos Modelos Representativos**

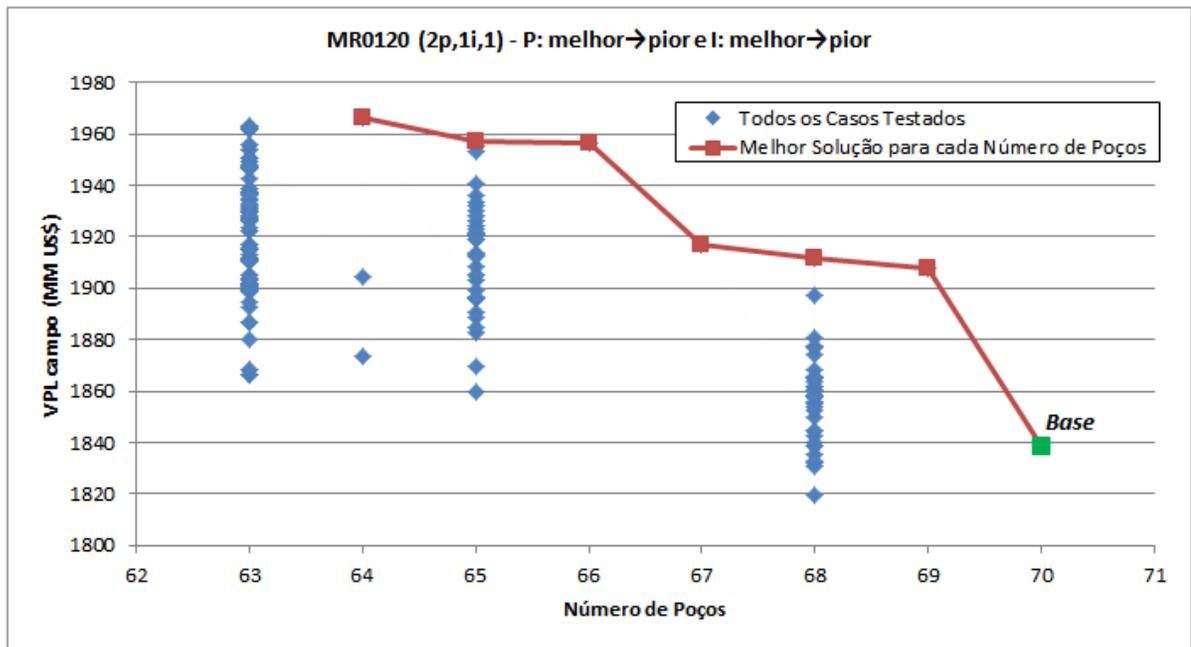
A otimização das estratégias dos modelos representativos é uma etapa muito importante para o cálculo do VDI, pois quanto melhor e mais eficiente a otimização de cada modelo, maior é a precisão e a confiabilidade do VDI calculado. Nesta etapa, seguem-se os mesmos procedimentos de seleção das estratégias determinísticas de produção descritos no Item 4.3.

As tabelas a seguir ilustram os resultados obtidos na aplicação e reaplicação do algoritmo, na qual foi destacada a opção de cronograma escolhida em cada modelo representativo. Logo após cada tabela, são mostrados os testes e retirada dos poços em cada configuração de cronograma responsável pelo máximo VPL de cada modelo. É importante ressaltar que o MR0000 (caso base) foi otimizado previamente como mostra a Tabela 6.7, não havendo a necessidade de refazer esse caso.

Os resultados da otimização do MR0120 são mostrados na Tabela 6.9 e na Figura 6.23; do MR0220 são mostrados na Tabela 6.10 e Figura 6.24; do MR1110 são mostrados na Tabela 6.11 e Figura 6.25; do MR1012 são mostrados na Tabela 6.12 e Figura 6.26; do MR1212 são mostrados na Tabela 6.13 e Figura 6.27; do MR2122 são mostrados na Tabela 6.14 e Figura 6.28; do MR2001 são mostrados na Tabela 6.15 e Figura 6.29; e do MR2212 são mostrados na Tabela 6.16 e Figura 6.30, respectivamente.

**Tabela 6.9.** Valores obtidos nas simulações para o MR0120.

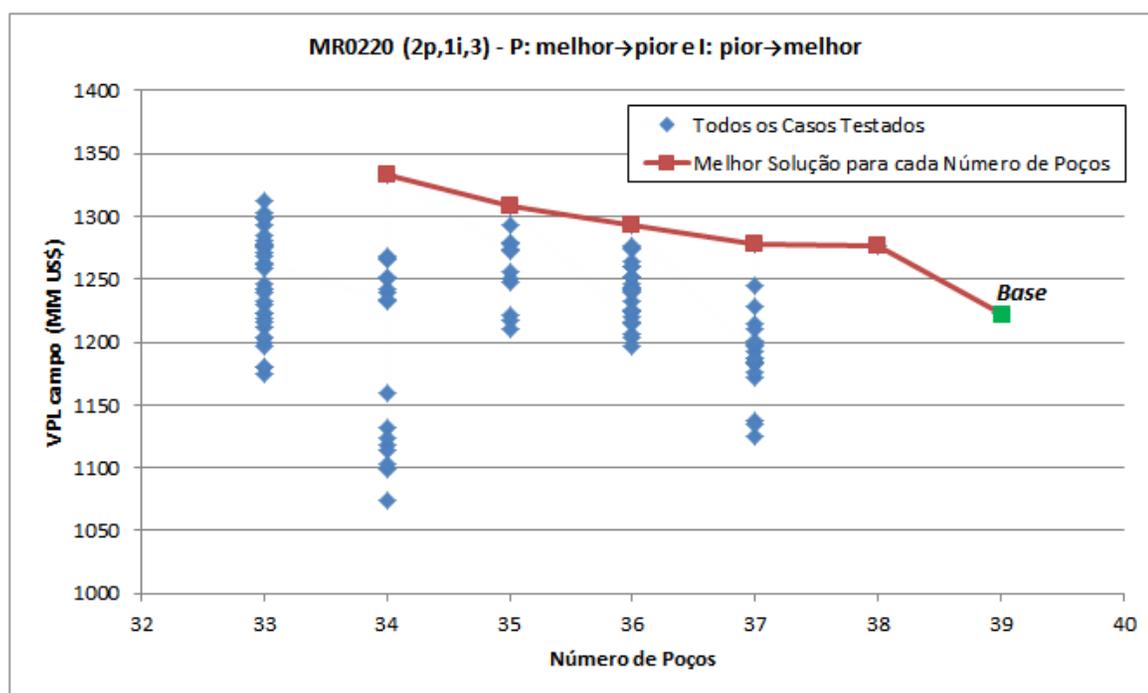
		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MM US\$)	Num. Sim
MR0120 0.0.5	Início	240	120	120	-1819	679.3	2974	629
	Fim	70	36	34	2568	203.8	1184	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MM US\$)	Num. Sim
MR0120 1.1.1	Início	70	36	34	1489	203.8	1184	123
	Fim	46	24	22	1884	135.9	929	
MR0120 1.1.2	Início	70	36	34	1550	203.8	1184	137
	Fim	66	34	32	1642	192.5	1142	
MR0120 1.1.3	Início	70	36	34	1636	203.8	1184	141
	Fim	70	36	34	1636	203.8	1184	
MR0120 1.1.4	Início	70	36	34	1472	203.8	1184	125
	Fim	52	27	25	1672	152.8	993	
MR0120 1.2.1	Início	70	36	34	1588	203.8	1184	124
	Fim	48	25	23	1841	141.5	950	
MR0120 1.2.2	Início	70	36	34	1567	203.8	1184	139
	Fim	68	35	33	1588	198.1	1163	
MR0120 1.2.3	Início	70	36	34	1623	203.8	1184	141
	Fim	70	36	34	1623	203.8	1184	
MR0120 1.2.4	Início	70	36	34	1511	203.8	1184	184
	Fim	48	26	22	1796	147.2	971	
MR0120 2.1.1	Início	70	36	34	1839	203.8	1184	170
	Fim	64	32	32	1966	181.1	1099	
MR0120 2.1.2	Início	70	36	34	1877	203.8	1184	139
	Fim	68	35	33	1897	198.1	1163	
MR0120 2.1.3	Início	70	36	34	1926	203.8	1184	141
	Fim	70	36	34	1926	203.8	1184	
MR0120 2.1.4	Início	70	36	34	1832	203.8	1184	169
	Fim	64	32	32	1956	181.1	1099	



**Figura 6.23.** Otimização da estratégia para o MR0120.

**Tabela 6.10.** Valores obtidos nas simulações para o MR0220.

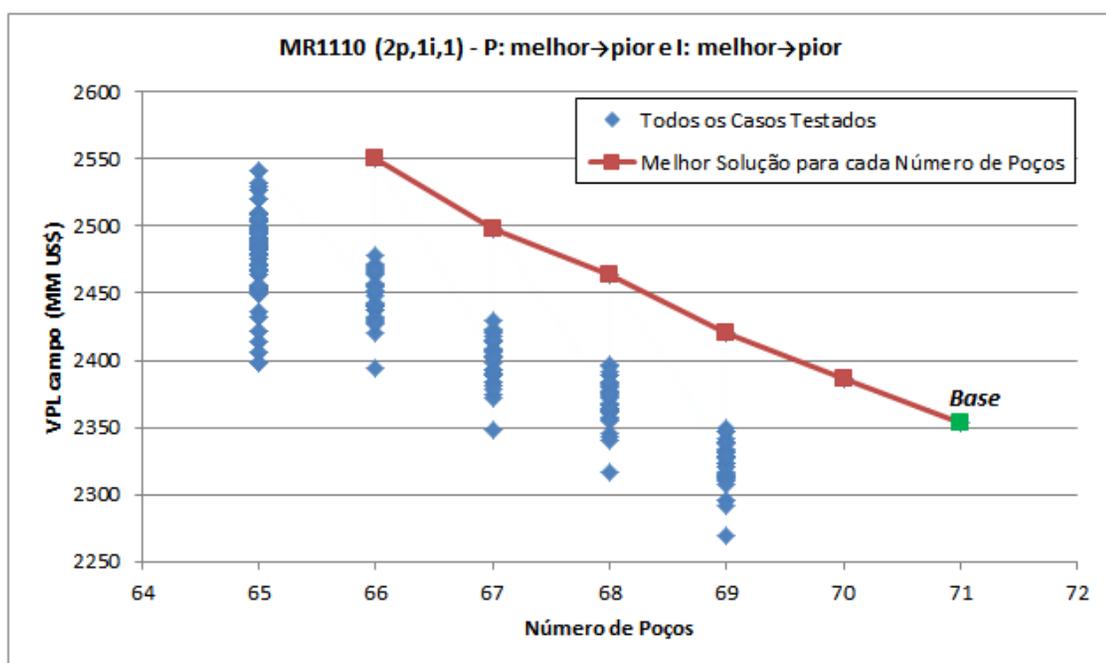
		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR0220 0.0.5	Início	240	120	120	-4390	679.3	2974	410
	Fim	39	21	18	1501	118.9	865	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR0220 1.1.1	Início	39	21	18	1082	118.9	865	92
	Fim	35	18	17	1153	101.9	801	
MR0220 1.1.2	Início	39	21	18	1095	118.9	865	79
	Fim	39	21	18	1095	118.9	865	
MR0220 1.1.3	Início	39	21	18	1077	118.9	865	92
	Fim	35	18	17	1132	101.9	801	
MR0220 1.1.4	Início	39	21	18	1021	118.9	865	76
	Fim	36	19	17	1069	107.6	822	
MR0220 1.2.1	Início	39	21	18	1117	118.9	865	77
	Fim	36	19	17	1128	107.6	822	
MR0220 1.2.2	Início	39	21	18	1106	118.9	865	76
	Fim	36	19	17	1134	107.6	822	
MR0220 1.2.3	Início	39	21	18	1133	118.9	865	79
	Fim	39	21	18	1133	118.9	865	
MR0220 1.2.4	Início	39	21	18	1108	118.9	865	79
	Fim	39	21	18	1108	118.9	865	
MR0220 2.1.1	Início	39	21	18	1237	118.9	865	95
	Fim	37	19	18	1303	107.6	822	
MR0220 2.1.2	Início	39	21	18	1234	118.9	865	76
	Fim	36	19	17	1276	107.6	822	
MR0220 2.1.3	Início	39	21	18	1222	118.9	865	111
	Fim	34	17	17	1333	96.2	780	
MR0220 2.1.4	Início	39	21	18	1204	118.9	865	92
	Fim	35	18	17	1246	101.9	801	



**Figura 6.24.** Otimização da estratégia para o MR0220.

**Tabela 6.11.** Valores obtidos nas simulações para o MR1110.

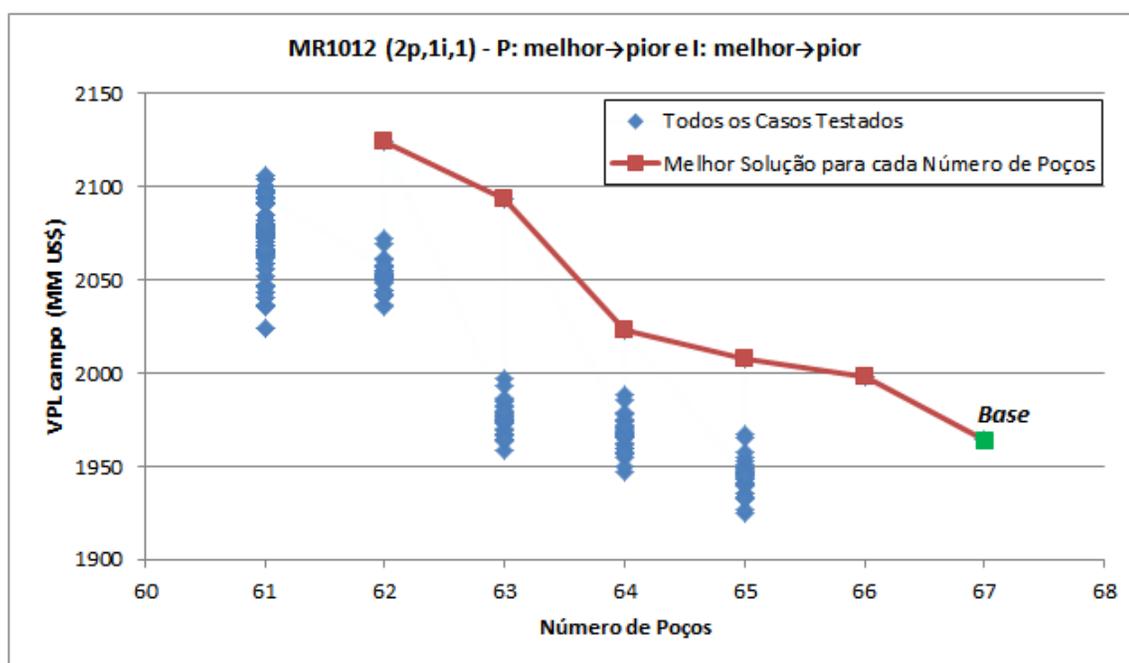
		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR1110 0.0.5	Início	270	140	130	-1990	792.5	3401	493
	Fim	71	38	33	3199	215.1	1227	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR1110 1.1.1	Início	71	38	33	1943	215.1	1227	136
	Fim	53	29	24	2125	164.2	1035	
MR1110 1.1.2	Início	71	38	33	1987	215.1	1227	143
	Fim	71	38	33	1987	215.1	1227	
MR1110 1.1.3	Início	71	38	33	2096	215.1	1227	143
	Fim	71	38	33	2096	215.1	1227	
MR1110 1.1.4	Início	71	38	33	1809	215.1	1227	135
	Fim	63	34	29	1922	192.5	1142	
MR1110 1.2.1	Início	71	38	33	2009	215.1	1227	139
	Fim	55	30	25	2234	169.8	1057	
MR1110 1.2.2	Início	71	38	33	2007	215.1	1227	139
	Fim	67	36	31	2028	203.8	1184	
MR1110 1.2.3	Início	71	38	33	2085	215.1	1227	143
	Fim	71	38	33	2085	215.1	1227	
MR1110 1.2.4	Início	71	38	33	1939	215.1	1227	128
	Fim	55	30	25	2136	169.8	1057	
MR1110 2.1.1	Início	71	38	33	2354	215.1	1227	270
	Fim	66	33	33	2551	186.8	1121	
MR1110 2.1.2	Início	71	38	33	2478	215.1	1227	143
	Fim	71	38	33	2478	215.1	1227	
MR1110 2.1.3	Início	71	38	33	2484	215.1	1227	143
	Fim	71	38	33	2484	215.1	1227	
MR1110 2.1.4	Início	71	38	33	1942	215.1	1227	193
	Fim	60	31	29	2348	175.5	1078	



**Figura 6.25.** Otimização da estratégia para o MR1110.

**Tabela 6.12.** Valores obtidos nas simulações para o MR1012.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR1012 0.0.5	Início	270	140	130	-3496	792.5	3401	484
	Fim	67	36	31	2684	203.8	1184	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR1012 1.1.1	Início	67	36	31	1664	203.8	1184	122
	Fim	52	28	24	1819	158.5	1014	
MR1012 1.1.2	Início	67	36	31	1276	203.8	1184	133
	Fim	65	35	30	1688	198.1	1163	
MR1012 1.1.3	Início	67	36	31	1767	203.8	1184	135
	Fim	67	36	31	1767	203.8	1184	
MR1012 1.1.4	Início	67	36	31	1229	203.8	1184	134
	Fim	66	35	31	1263	198.1	1163	
MR1012 1.2.1	Início	67	36	31	1732	203.8	1184	135
	Fim	67	36	31	1732	203.8	1184	
MR1012 1.2.2	Início	67	36	31	1626	203.8	1184	135
	Fim	67	36	31	1626	203.8	1184	
MR1012 1.2.3	Início	67	36	31	1777	203.8	1184	135
	Fim	67	36	31	1777	203.8	1184	
MR1012 1.2.4	Início	67	36	31	1639	203.8	1184	131
	Fim	63	34	29	1694	192.5	1142	
MR1012 2.1.1	Início	67	36	31	1964	203.8	1184	254
	Fim	62	31	31	2124	175.5	1078	
MR1012 2.1.2	Início	67	36	31	1581	203.8	1184	134
	Fim	66	35	31	1869	198.1	1163	
MR1012 2.1.3	Início	67	36	31	2071	203.8	1184	135
	Fim	67	36	31	2071	203.8	1184	
MR1012 2.1.4	Início	67	36	31	1464	203.8	1184	202
	Fim	51	26	25	2075	147.2	971	



**Figura 6.26.** Otimização da estratégia para o MR 1012.

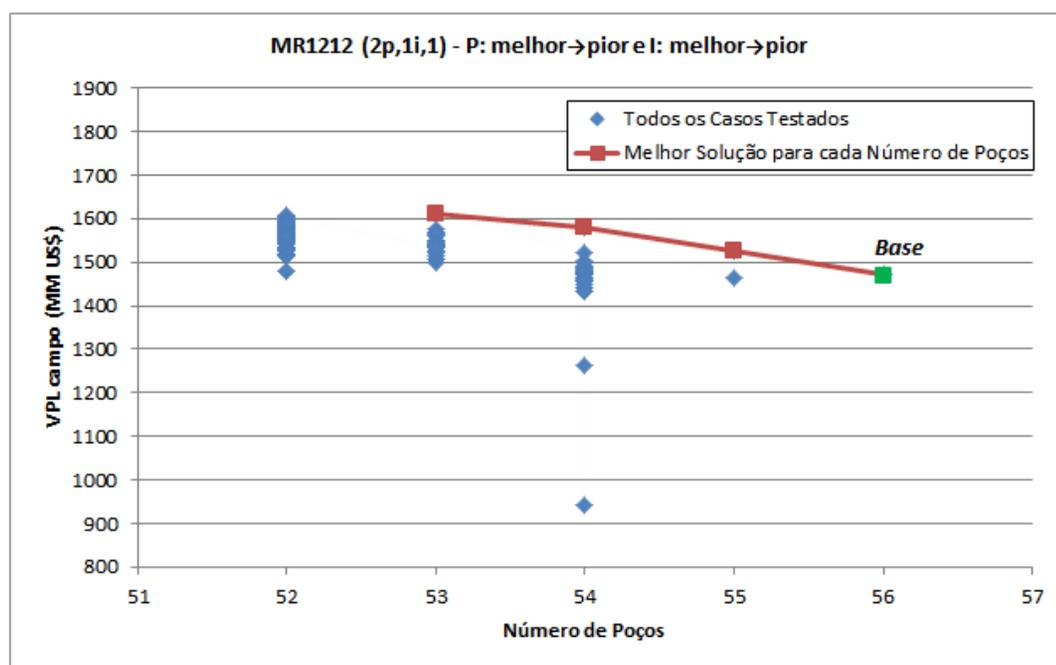
**Tabela 6.13.** Valores obtidos nas simulações para o MR1212.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR1212 0.0.5	Início	270	140	130	-4960	792.5	3401	491
	Fim	56	30	26	1967	169.8	1057	

		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR1212 1.1.1	Início	56	30	26	1242	169.8	1057	105
	Fim	48	26	22	1362	147.2	971	
MR1212 1.1.2	Início	56	30	26	1204	169.8	1057	113
	Fim	56	30	26	1204	169.8	1057	
MR1212 1.1.3	Início	56	30	26	1336	169.8	1057	113
	Fim	56	30	26	1336	169.8	1057	
MR1212 1.1.4	Início	56	30	26	1149	169.8	1057	110
	Fim	48	26	22	1329	147.2	971	

MR1212 1.2.1	Início	56	30	26	1313	169.8	1057	114
	Fim	48	26	22	1479	147.2	971	
MR1212 1.2.2	Início	56	30	26	1266	169.8	1057	111
	Fim	54	29	25	1274	164.2	1035	
MR1212 1.2.3	Início	56	30	26	1345	169.8	1057	111
	Fim	52	28	24	1407	158.5	1014	
MR1212 1.2.4	Início	56	30	26	1245	169.8	1057	110
	Fim	44	24	20	1400	135.9	929	

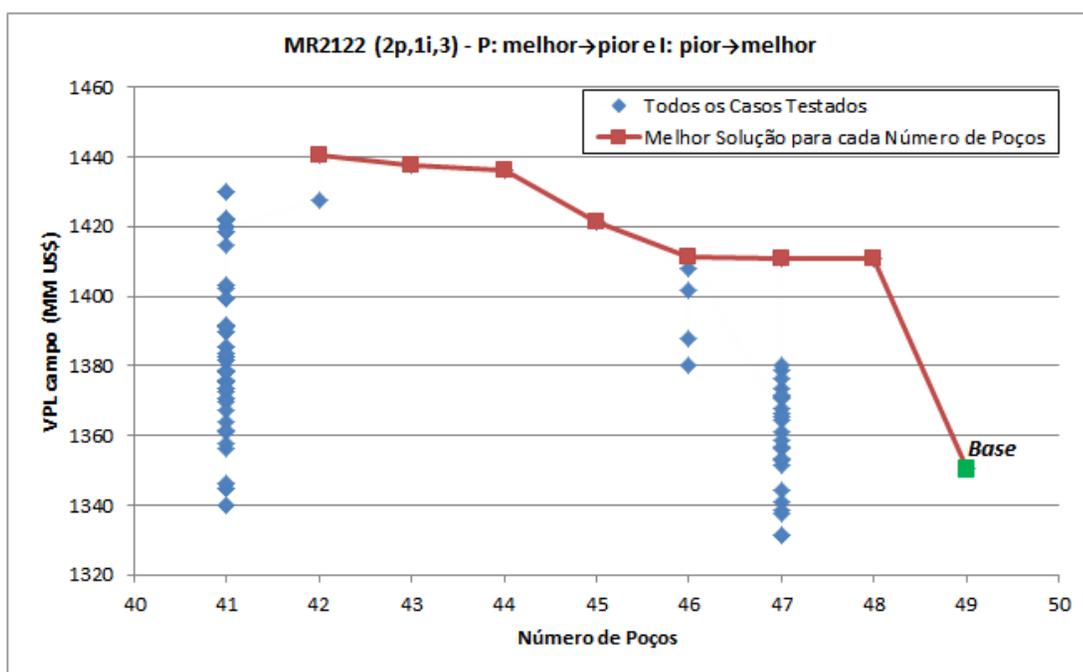
MR1212 2.1.1	Início	56	30	26	1471	169.8	1057	162
	Fim	53	27	26	1612	152.8	993	
MR1212 2.1.2	Início	56	30	26	1511	169.8	1057	113
	Fim	56	30	26	1511	169.8	1057	
MR1212 2.1.3	Início	56	30	26	1564	169.8	1057	113
	Fim	56	30	26	1564	169.8	1057	
MR1212 2.1.4	Início	56	30	26	1453	169.8	1057	161
	Fim	51	26	25	1585	147.2	971	



**Figura 6.27.** Otimização da estratégia para o MR1212.

**Tabela 6.14.** Valores obtidos nas simulações para o MR2122.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR2122 0.0.5	Início	160	80	80	-1256	452.9	2122	353
	Fim	49	25	24	1710	141.5	950	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR2122 1.1.1	Início	49	25	24	1188	141.5	950	99
	Fim	49	25	24	1188	141.5	950	
MR2122 1.1.2	Início	49	25	24	1147	141.5	950	123
	Fim	48	25	23	1168	141.5	950	
MR2122 1.1.3	Início	49	25	24	1180	141.5	950	117
	Fim	42	22	20	1244	124.5	886	
MR2122 1.1.4	Início	49	25	24	1157	141.5	950	123
	Fim	48	25	23	1166	141.5	950	
MR2122 1.2.1	Início	49	25	24	1200	141.5	950	115
	Fim	40	21	19	1307	118.9	865	
MR2122 1.2.2	Início	49	25	24	1167	141.5	950	121
	Fim	46	24	22	1201	135.9	929	
MR2122 1.2.3	Início	49	25	24	1196	141.5	950	93
	Fim	33	17	16	1283	96.2	780	
MR2122 1.2.4	Início	49	25	24	1172	141.5	950	97
	Fim	45	23	22	1200	130.2	907	
MR2122 2.1.1	Início	49	25	24	1360	141.5	950	97
	Fim	46	23	23	1426	130.2	907	
MR2122 2.1.2	Início	49	25	24	1346	141.5	950	97
	Fim	40	20	20	1395	113.2	844	
MR2122 2.1.3	Início	49	25	24	1351	141.5	950	95
	Fim	42	21	21	1441	118.9	865	
MR2122 2.1.4	Início	49	25	24	1356	141.5	950	97
	Fim	46	23	23	1380	130.2	907	



**Figura 6.28.** Otimização da estratégia para o MR2122.

**Tabela 6.15.** Valores obtidos nas simulações para o MR2001.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR2001 0.0.5	Início	160	80	80	-1969	452.9	2122	399
	Fim	42	22	20	1368	124.5	886	

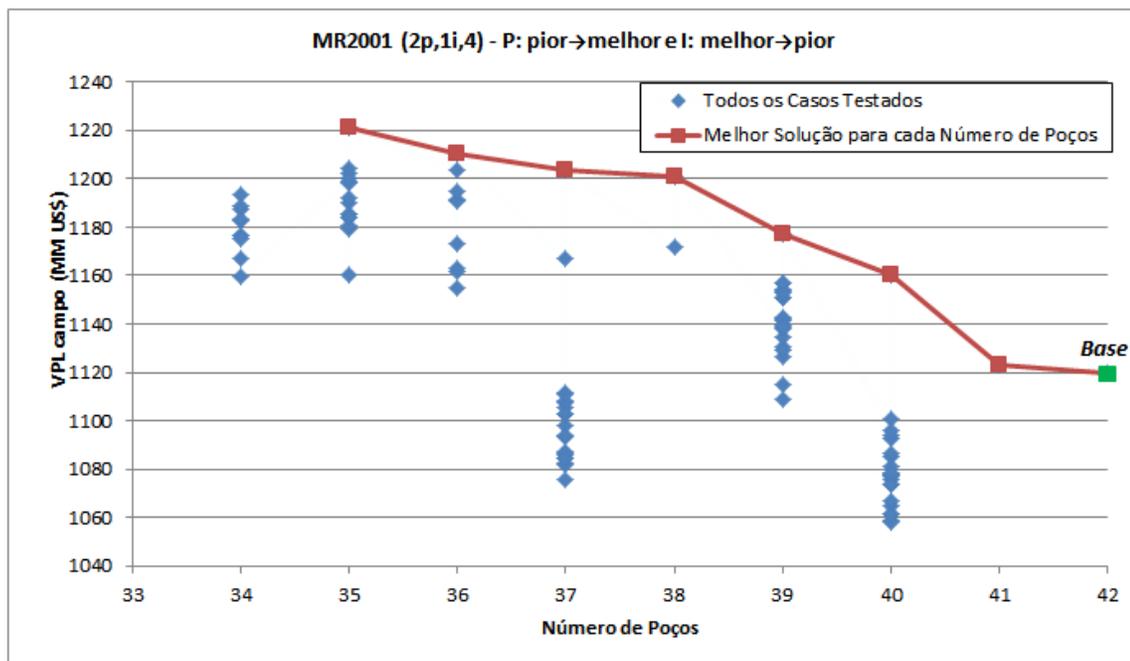
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR2001 1.1.1	Início	42	22	20	962	124.5	886	79
	Fim	36	19	17	1015	107.6	822	
MR2001 1.1.2	Início	42	22	20	968	124.5	886	97
	Fim	35	19	16	997	107.6	822	
MR2001 1.1.3	Início	42	22	20	978	124.5	886	83
	Fim	40	21	19	994	118.9	865	
MR2001 1.1.4	Início	42	22	20	946	124.5	886	79
	Fim	36	19	17	984	107.6	822	

MR2001 1.2.1	Início	42	22	20	976	124.5	886	83
	Fim	40	21	19	993	118.9	865	
MR2001 1.2.2	Início	42	22	20	976	124.5	886	82
	Fim	36	19	17	1016	107.6	822	
MR2001 1.2.3	Início	42	22	20	982	124.5	886	83
	Fim	40	21	19	998	118.9	865	
MR2001 1.2.4	Início	42	22	20	964	124.5	886	94
	Fim	34	18	16	1051	101.9	801	

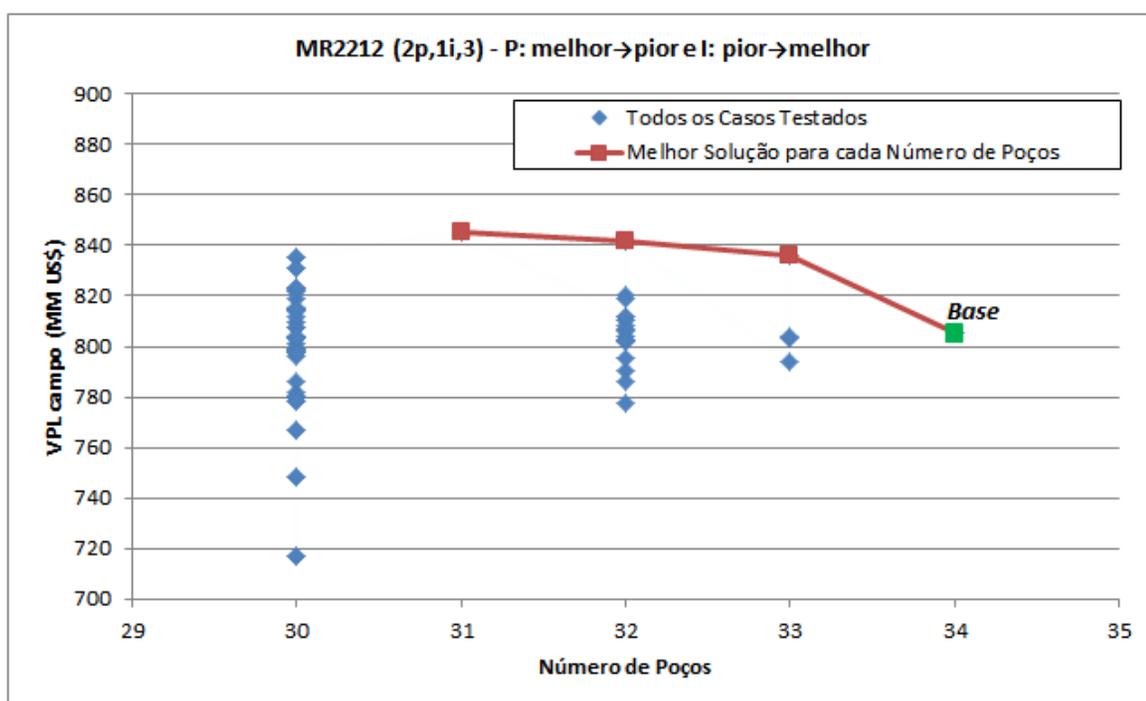
MR2001 2.1.1	Início	42	22	20	1120	124.5	886	103
	Fim	40	20	20	1203	113.2	844	
MR2001 2.1.2	Início	42	22	20	1135	124.5	886	103
	Fim	40	20	20	1187	113.2	844	
MR2001 2.1.3	Início	42	22	20	1136	124.5	886	103
	Fim	40	20	20	1208	113.2	844	
MR2001 2.1.4	Início	42	22	20	1120	124.5	886	99
	Fim	35	18	17	1221	101.9	801	



**Figura 6.29.** Otimização da estratégia para o MR2001.

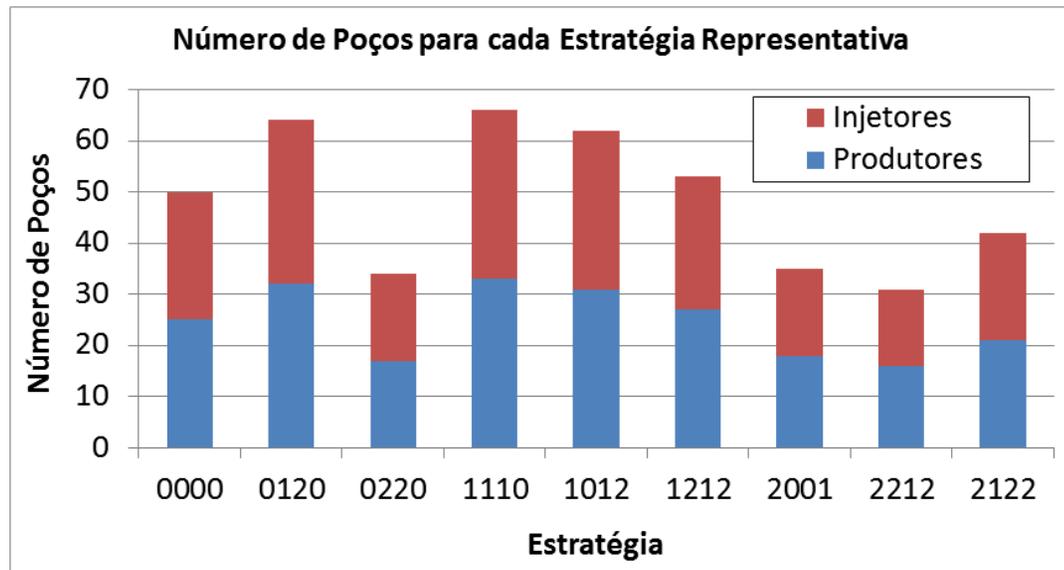
**Tabela 6.16.** Valores obtidos nas simulações para o MR2212.

		Poços Total	Produtores	Injetores	IEC (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR2212 0.0.5	Início	160	80	80	-2899	452.9	2122	376
	Fim	34	18	16	939	101.9	801	
		Poços Total	Produtores	Injetores	VPL (MM US\$)	Capacidade (mil bbl/dia)	Custo Plataforma (MMUS\$)	Num. Sim
MR2212 1.1.1	Início	34	18	16	660	101.9	801	65
	Fim	30	16	14	693	90.6	758	
MR2212 1.1.2	Início	34	18	16	673	101.9	801	67
	Fim	32	17	15	675	96.2	780	
MR2212 1.1.3	Início	34	18	16	683	101.9	801	69
	Fim	34	18	16	683	101.9	801	
MR2212 1.1.4	Início	34	18	16	654	101.9	801	67
	Fim	32	17	15	658	96.2	780	
MR2212 1.2.1	Início	34	18	16	674	101.9	801	63
	Fim	24	13	11	738	73.6	694	
MR2212 1.2.2	Início	34	18	16	673	101.9	801	69
	Fim	34	18	16	673	101.9	801	
MR2212 1.2.3	Início	34	18	16	680	101.9	801	69
	Fim	34	18	16	680	101.9	801	
MR2212 1.2.4	Início	34	18	16	669	101.9	801	69
	Fim	34	18	16	669	101.9	801	
MR2212 2.1.1	Início	34	18	16	788	101.9	801	67
	Fim	31	16	15	825	90.6	758	
MR2212 2.1.2	Início	34	18	16	805	101.9	801	65
	Fim	30	16	14	835	90.6	758	
MR2212 2.1.3	Início	34	18	16	805	101.9	801	67
	Fim	31	16	15	845	90.6	758	
MR2212 2.1.4	Início	34	18	16	787	101.9	801	67
	Fim	31	16	15	817	90.6	758	



**Figura 6.30.** Otimização da estratégia para o MR2212.

O número de poços em cada modelo representativo otimizado é mostrado na Figura 6.31.



**Figura 6.31.** Número de poços dos modelos representativos após a otimização.

#### 6.2.1.10 Seleção das Estratégias de Produção Probabilísticas

Nesta etapa, as nove estratégias determinísticas da Tabela 6.8 são inseridas nos 81 modelos da árvore de decisão, resultando em 729 modelos a serem analisados. É importante destacar que na simulação dos modelos, os parâmetros econômicos utilizados e o custo da plataforma de produção são os mesmos das estratégias representativas inseridas nos modelos. A variação estrutural dos modelos é responsável pelos poços secos das estratégias permutadas, que devem ser excluídos dos arquivos de simulação. Os itens a seguir descrevem quais as estratégias que tiveram os poços excluídos e em quais modelos isso ocorreu:

- As estratégias referentes aos modelos estruturais prováveis (E0120, E0000 e E0220) quando inseridas nos modelos estruturais pessimistas, demandaram a exclusão de poços que ficaram externos ao reservatório. Nos modelos estruturais otimistas, as estratégias foram integralmente inseridas, sem alterações no número de poços.
- As estratégias dos modelos estruturais otimistas (E1110, E1012 e E1212) quando inseridas nos modelos estruturais pessimistas e prováveis, demandaram a exclusão dos poços que ficaram externos ao reservatório.

- Por fim, as estratégias representativas referentes aos modelos estruturais pessimistas (E2122, E2001 e E2212) foram integralmente inseridas nos demais modelos estruturais.

A exclusão dos poços causa alterações nos arquivos de entrada, especificamente na retirada de palavras-chave de abertura dos poços nos tempos de simulação, que descaracteriza os cronogramas em cada modelo de simulação. O reajuste manual é necessário para manter as mesmas configurações iniciais de cronograma provenientes das estratégias determinísticas dos modelos representativos. Após adequar os modelos de simulação, todos são simulados e seus VPL determinados. Por fim, os valores obtidos na simulação são corrigidos quanto ao número de poços secos, o que implica na soma dos custos destes para cada modelo estrutural, conforme a Tabela 5.1.

Após as correções, chega-se aos valores presentes líquidos finais em cada modelo (ramo) da árvore de decisão. Esses valores são multiplicados pelas respectivas probabilidades de ocorrência dos modelos, resultando nos VME para as nove estratégias representativas, como mostra a Tabela 6.17 a seguir. A disposição dos modelos nesta tabela está na mesma ordem dos modelos na árvore de decisão para facilitar a visualização dos dados e os cálculos de  $VME_{CI}$  e  $VME_{SI}$ . A próxima etapa consiste no cálculo dos  $VME_{CI}$ , que possui algumas particularidades dependendo da quantidade de ramos ou grupos da árvore de decisão, e do  $VME_{SI}$ .

#### **6.2.1.11 Cálculo do $VME_{CI}$ e $VME_{SI}$**

Como o cálculo do  $VME_{CI}$  é dependente da quantidade de ramos ou grupos passíveis de redução de incerteza existentes no problema, deve-se definir uma única e melhor estratégia para cada ramo ou grupo passível de redução de incerteza. Deste modo, a Tabela 6.18 está dividida segundo os nove grupos da árvore de decisão com os VME para cada estratégia.

**Tabela 6.17.** VME para cada estratégia nos 81 modelos da árvore de decisão.

	VME (MM US\$)								
	E0000	E0120	E0220	E1110	E1012	E1212	E2001	E2122	E2212
M2222	0.91	0.36	1.00	0.55	0.60	0.74	1.22	0.92	1.14
M2220	2.69	1.04	2.96	1.62	1.77	2.16	3.63	2.72	3.38
M2221	0.89	0.34	0.98	0.53	0.58	0.71	1.20	0.90	1.12
M2202	2.87	1.40	3.02	1.94	2.01	2.37	3.88	3.11	3.60
M2200	8.47	4.02	8.90	5.61	5.86	6.88	11.48	9.13	10.62
M2201	2.78	1.31	2.93	1.82	1.90	2.23	3.79	3.00	3.49
M2212	0.99	0.57	1.02	0.74	0.76	0.86	1.35	1.13	1.35
M2210	2.90	1.61	2.98	2.13	2.19	2.48	3.97	3.29	3.70
M2211	0.95	0.51	0.98	0.68	0.71	0.80	1.30	1.07	1.21
M2022	4.34	3.30	4.11	3.89	3.63	3.65	5.51	4.86	5.00
M2020	12.88	9.82	12.19	11.50	10.73	10.72	16.36	14.44	14.86
M2021	4.27	3.25	4.03	3.79	3.53	3.52	5.42	4.78	4.91
M2002	13.30	11.19	12.35	12.58	11.50	11.34	17.17	15.91	15.52
M2000	39.24	32.96	36.51	37.00	33.72	33.21	50.84	46.98	45.97
M2001	12.92	10.83	12.04	12.13	11.03	10.88	17.58	15.48	15.15
M2012	4.52	4.10	4.16	4.50	4.10	3.99	5.90	5.63	5.35
M2010	13.27	11.94	12.22	13.14	11.97	11.66	17.38	16.48	15.78
M2011	4.36	3.89	4.01	4.28	3.90	3.81	5.72	5.39	5.19
M2122	1.86	1.74	1.64	1.89	1.69	1.58	2.32	2.30	2.08
M2120	5.50	5.17	4.86	5.60	4.99	4.67	6.89	6.54	6.18
M2121	1.82	1.71	1.61	1.85	1.64	1.54	2.28	2.17	2.05
M2102	5.61	5.69	4.92	5.95	5.24	4.86	7.17	7.08	6.40
M2100	16.57	16.81	14.57	17.53	15.39	14.31	21.25	20.90	18.98
M2101	5.46	5.54	4.81	5.76	5.05	4.71	7.01	6.90	6.27
M2112	1.90	2.02	1.65	2.08	1.84	1.69	2.45	2.45	2.19
M2110	5.58	5.90	4.87	6.10	5.38	4.96	7.22	7.20	6.47
M2111	1.84	1.93	1.60	2.00	1.76	1.63	2.38	2.36	2.13
M0222	5.77	3.97	6.29	4.48	5.24	5.90	3.86	2.94	3.60
M0220	17.18	11.83	19.20	13.29	15.59	17.50	11.47	8.75	10.70
M0221	5.70	3.51	6.21	4.39	5.16	5.78	3.80	2.89	3.54
M0202	18.09	8.31	19.43	14.50	16.72	18.60	12.22	9.92	11.34
M0200	53.71	24.32	57.62	42.72	49.49	54.98	36.17	29.21	33.53
M0201	17.75	7.96	19.05	14.03	16.31	18.12	11.93	9.60	11.03
M0212	6.24	3.12	6.56	5.19	5.92	6.50	4.24	3.60	3.95
M0210	18.44	9.01	19.33	15.18	17.44	19.16	12.48	10.49	11.64
M0211	6.07	2.91	6.37	4.96	5.72	6.30	4.10	3.41	3.82
M0022	24.81	20.64	23.75	22.43	24.20	24.66	17.09	15.18	15.55
M0020	73.89	61.54	70.65	66.63	71.93	73.19	50.83	45.13	46.25
M0021	24.53	20.42	23.43	22.05	23.82	24.21	16.84	14.95	15.30
M0002	77.31	66.97	71.99	71.11	75.86	76.15	53.23	49.62	48.21
M0000	241.54	198.42	213.42	210.24	224.60	225.38	157.63	146.61	142.83

	VME (MM US\$)								
	E0000	E0120	E0220	E1110	E1012	E1212	E2001	E2122	E2212
M0001	75.95	65.51	70.55	69.28	74.14	74.36	52.08	48.31	47.10
M0012	26.53	18.05	24.09	24.93	26.40	26.20	18.26	17.47	16.58
M0010	78.46	52.78	71.15	73.34	77.89	77.36	53.82	51.26	48.96
M0011	25.87	17.28	23.46	24.06	25.63	25.46	17.71	16.79	16.10
M0122	10.30	9.36	9.08	9.99	10.30	9.96	7.15	6.81	6.42
M0120	30.67	28.31	27.01	29.70	30.61	29.56	21.24	20.23	19.10
M0121	10.17	9.25	8.95	9.83	10.13	9.78	7.04	6.71	6.33
M0102	31.97	29.95	27.26	31.39	31.95	30.38	22.07	21.82	19.75
M0100	94.95	88.75	80.89	92.95	94.66	89.97	65.41	64.48	58.54
M0101	31.41	29.35	26.74	30.64	31.25	29.70	21.60	21.28	19.33
M0112	10.88	10.43	9.11	10.89	11.03	10.38	7.53	7.54	6.75
M0110	32.20	30.77	26.94	32.11	32.58	30.66	22.22	22.14	19.94
M0111	10.63	10.12	8.88	10.55	10.73	10.10	7.31	7.26	6.57
M1222	1.98	1.39	2.15	1.83	2.07	2.33	1.33	1.03	1.25
M1220	5.89	4.13	6.39	5.43	6.16	6.90	3.97	3.06	3.71
M1221	1.95	1.37	2.12	1.79	2.04	2.28	1.31	1.01	1.23
M1202	6.18	2.96	6.62	5.89	6.57	7.37	4.22	3.45	3.92
M1200	18.35	8.68	19.65	17.37	19.47	21.78	12.49	10.17	11.61
M1201	6.06	2.84	6.50	5.72	6.43	7.18	4.12	3.34	3.82
M1212	2.13	1.10	2.23	2.10	2.31	2.58	1.46	1.25	1.37
M1210	6.29	3.19	6.59	6.14	6.82	7.59	4.30	3.64	4.02
M1211	2.07	1.04	2.17	2.01	2.24	2.50	1.41	1.19	1.32
M1022	8.43	7.08	8.07	8.69	9.34	9.73	5.84	5.20	5.33
M1020	25.09	21.10	24.00	25.81	27.77	28.90	17.37	15.48	15.85
M1021	8.33	7.00	7.96	8.54	9.20	9.56	5.76	5.13	5.24
M1002	26.21	22.94	24.44	27.53	29.33	30.34	18.18	16.97	16.50
M1000	77.88	68.00	72.47	81.45	86.92	89.86	53.84	50.17	48.90
M1001	25.76	22.46	23.96	26.84	28.70	29.67	17.79	16.53	16.13
M1012	8.99	6.22	8.18	9.63	10.20	10.47	6.23	5.97	5.67
M1010	26.59	18.21	24.15	28.36	30.10	30.90	18.37	17.52	16.75
M1011	8.77	5.96	7.97	9.32	9.91	10.17	6.05	5.74	5.51
M1122	3.48	3.19	3.08	3.80	3.98	3.94	2.43	2.32	2.19
M1120	10.37	9.51	9.15	11.29	11.85	11.69	7.22	6.89	6.51
M1121	3.44	3.15	3.03	3.74	3.93	3.87	2.39	2.28	2.16
M1102	10.80	10.20	9.23	11.96	12.39	12.12	7.50	7.42	6.73
M1100	32.09	30.24	27.41	35.42	36.75	35.90	22.23	21.92	19.95
M1101	10.62	10.00	9.06	11.69	12.14	11.87	7.34	7.24	6.59
M1112	3.68	3.55	3.08	4.15	4.27	4.14	2.56	2.56	2.30
M1110	10.88	10.48	9.12	12.24	12.62	12.25	7.55	7.52	6.79
M1111	3.59	3.45	3.01	4.03	4.16	4.04	2.49	2.47	2.24

**Tabela 6.18.** VME para cada grupo da árvore de decisão conforme a estratégia.

	VME (MM US\$)								
	E0000	E0120	E0220	E1110	E1012	E1212	E2001	E2212	E2122
VME Grupo 1	23.45	11.17	24.76	15.63	16.38	19.24	31.82	25.26	29.60
VME Grupo 2	109.08	91.27	101.62	102.81	94.11	92.77	141.88	129.95	127.72
VME Grupo 3	46.13	46.50	40.53	48.77	42.97	39.95	58.97	57.89	52.75
VME Grupo 4	148.96	74.94	160.05	118.74	137.57	152.85	100.27	80.82	93.14
VME Grupo 5	648.88	521.59	592.51	584.07	624.45	626.98	437.50	405.32	396.88
VME Grupo 6	263.17	246.29	224.86	258.05	263.25	250.50	181.57	178.26	162.73
VME Grupo 7	50.90	26.70	54.41	48.27	54.11	60.51	34.62	28.14	32.25
VME Grupo 8	216.04	178.97	201.19	226.18	241.47	249.60	149.44	138.70	135.89
VME Grupo 9	88.95	83.76	76.18	98.32	102.09	99.81	61.72	60.62	55.44
<b>VME<sub>SI</sub></b>	<b>1595.56</b>	<b>1281.20</b>	<b>1476.11</b>	<b>1500.85</b>	<b>1576.41</b>	<b>1592.21</b>	<b>1197.80</b>	<b>1104.95</b>	<b>1086.40</b>

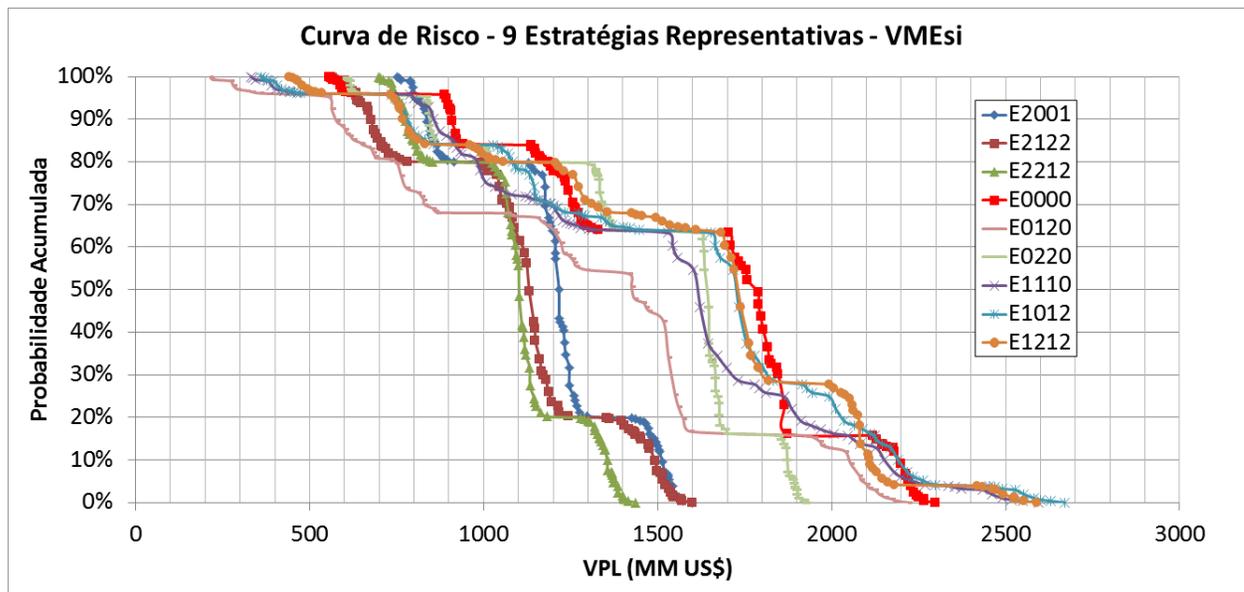
Os valores destacados em azul mostram quais as estratégias que maximizam o VME em cada grupo. A somatória destes corresponde ao  $VME_{CI}$ , conforme a Equação 3.3, resultando em  $VME_{CI} = US\$ 1717,06$  milhões. O  $VME_{SI}$  independe da quantidade existente de ramos ou grupos passíveis de redução de incerteza, ou seja, basta somar os VME de todos os grupos para cada estratégia e selecionar aquele que possui o seu máximo valor, conforme a Equação 3.2. Desta forma, a estratégia E0000 resultou no maior valor e foi selecionado  $VME_{SI} = US\$ 1595,56$  milhões.

#### 6.2.1.12 Cálculo do VDI

De acordo com a Equação 3.1, o valor da informação é obtido a partir da diferença entre o  $VME_{CI}$  e o  $VME_{SI}$ , resultando em um  $VDI = US\$ 121,50$  milhões. Observa-se que o valor da informação é quatro vezes maior que o custo de obtenção da informação através da perfuração de um poço, estimado em US\$ 30 milhões. Isto ocorre principalmente pela diferença de tamanho entre os modelos geológicos, o que aumenta o valor da informação adicionada ao projeto. Além disto, a automatização do processo de otimização da estratégia e o número elevado de simulações tornam o VDI mais preciso.

#### 6.2.1.13 Curva de Risco - $VME_{SI}$

A análise do VDI pode ser feita de forma quantitativa, através das tabelas de VME, ou de forma qualitativa, através da visualização das curvas de risco. As curvas são importantes pois auxiliam na escolha da melhor estratégia a ser adotada no projeto, segundo os critérios adotados pelo gerente e seu nível de aversão ao risco. A Figura 6.32 ilustra as nove possíveis curvas de risco para o caso sem informação.

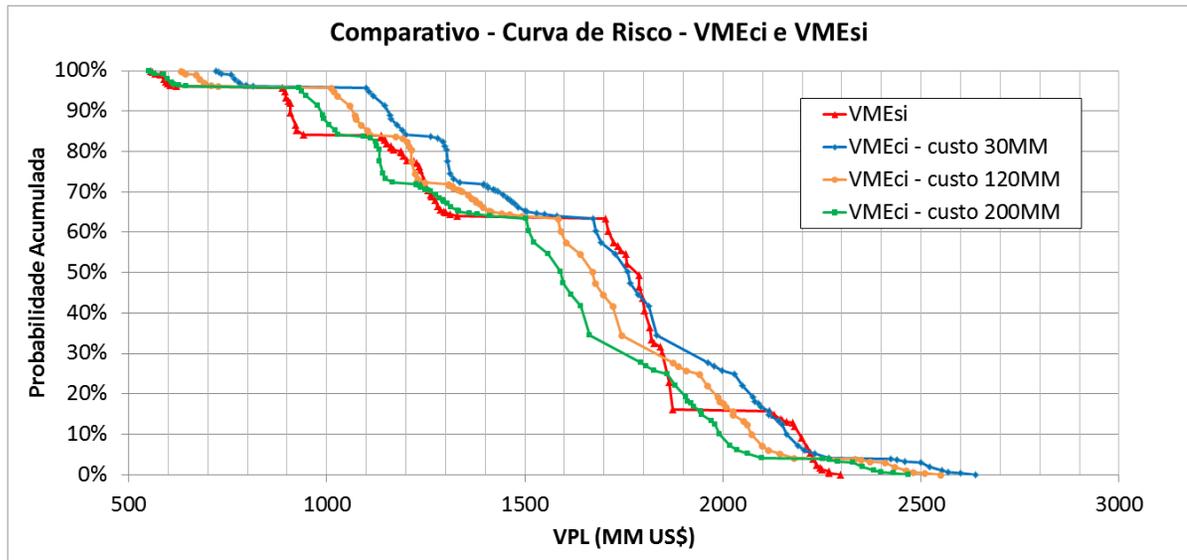


**Figura 6.32.** Curva de risco dos modelos no caso sem informação.

Nesta análise, a maximização do VME foi o critério escolhido para selecionar a estratégia de produção quando não há disponibilidade de informação, sendo a estratégia E0000 aquela com maior VME dentre todas as estratégias testadas, mostrada em vermelho no gráfico. Mas não há restrições quanto à escolha de outra estratégia pelo gerente. Caso este priorize os modelos otimistas do projeto, poderia optar pela estratégia E1212 por exemplo, com VME menor que a estratégia E0000 mas com ganhos maiores nos modelos estruturais otimistas. Apesar da curva de risco fornecer informações úteis e a possibilidade de priorizar determinadas estratégias ou modelos através do maior VME, é importante ponderar também a relação VME vs. Risco, pois há a possibilidade de escolha de uma estratégia com um bom valor de VME mas com um risco muito grande. Desta forma, pode-se optar por uma estratégia mais conservadora, como a estratégia pessimista, que fornece ganhos e riscos menores.

#### 6.2.1.14 Curva de Risco - $VME_{CI}$

A curva de risco com informação é única e composta pelos modelos cujos VME foram maximizados pelas estratégias em cada grupo, conforme os valores mostrados na Tabela 6.18. Contudo, esta curva considera o custo da informação (neste caso, a perfuração de um poço estimado em US\$ 30 milhões), sendo necessário descontá-lo em cada um dos modelos que compõe a curva de risco, obtendo assim a curva de risco para o  $VME_{CI}$ , em azul, como mostra a Figura 6.33.



**Figura 6.33.** Curva de risco para o caso com informação (incluindo o custo da informação).

Na comparação com a curva de risco do  $VME_{SI}$ , em vermelho, é perceptível que a informação comprada compensa o seu investimento, já que a maior parte da curva do  $VME_{CI}$  está deslocada para a direita da curva sem informação. A partir do momento que o custo da informação se aproxima do VDI, em torno de US\$ 120 milhões, surgem dúvidas quanto à validade da compra desta informação, sobretudo se os modelos estruturais prováveis forem priorizados pelo gerente, como mostra a curva destacada em laranja. Quando o custo da informação ultrapassa o VDI, já não compensa a compra da informação frente ao retorno financeiro proporcionado por esta, destacado pela curva de risco em verde, onde a informação custa US\$ 200 milhões.

## 6.2.2 Cálculo do VDI – Um Atributo Passível de Redução de Incerteza

Na abordagem deste item, o único atributo passível de redução da incerteza com a aquisição da informação é o modelo estrutural, que transforma a árvore de derivação da Figura 6.14 para a árvore de decisão mostrada na Figura 6.34, subdividida agora em três grupos. É importante frisar que os valores presentes líquidos e as probabilidades de ocorrência dos 81 modelos de simulação mostrados na Tabela 6.17 não se alteram, somente a forma como se calcula o VME parcial de cada grupo no caso com informação, como mostra a Tabela 6.19 a seguir.

**Tabela 6.19.** VME para árvore de decisão com um atributo passível de redução de incerteza.

	VME (MM US\$)								
	E0000	E0120	E0220	E1110	E1012	E1212	E2001	E2212	E2122
VME Grupo 1	178.65	148.94	166.91	167.21	153.46	151.96	232.67	213.09	210.07
VME Grupo 2	1061.01	842.82	977.42	960.87	1025.28	1030.33	719.34	664.40	652.75
VME Grupo 3	355.89	289.44	331.78	372.77	397.67	409.92	245.78	227.46	223.58

A somatória dos máximos VME parciais de cada grupo corresponde ao valor monetário com informação. Portanto, o  $VME_{CI} = US\$ 1703,60$  milhões. O  $VME_{SI}$  permanece o mesmo da Tabela 6.18, portanto,  $VME_{SI} = US\$ 1595,56$  milhões. Assim sendo, para o caso com um atributo passível de redução de incerteza, o  $VDI = US\$ 108,04$  milhões.

### 6.2.3 Cálculo do VDI – Quatro Atributos Passíveis de Redução de Incerteza

A análise obtida neste item tem como objetivo mostrar a variação do valor da informação considerando a redução completa da incerteza de todos os atributos incertos, modelo estrutural (*areas*), porosidade (*por*), permeabilidade vertical (*permi*) e horizontal (*permk*), através de informações adicionais. Espera-se, portanto, que o conhecimento referente às permeabilidades influencie a definição da estratégia de produção e aumente o VDI em relação às análises anteriores.

A aquisição da informação transforma a árvore de derivação da Figura 6.14 na árvore de decisão da Figura 6.35, onde todos os nós de derivação se alteram para nós de decisão, sendo composta por 81 grupos. Assim, pela inexistência de dúvidas quanto aos atributos incertos dos modelos, basta escolher a estratégia que possui o maior VME dentre todos os ramos da árvore, que será  $VME_{CI} = US\$ 241,54$  milhões, correspondente à estratégia E0000 no M0000.

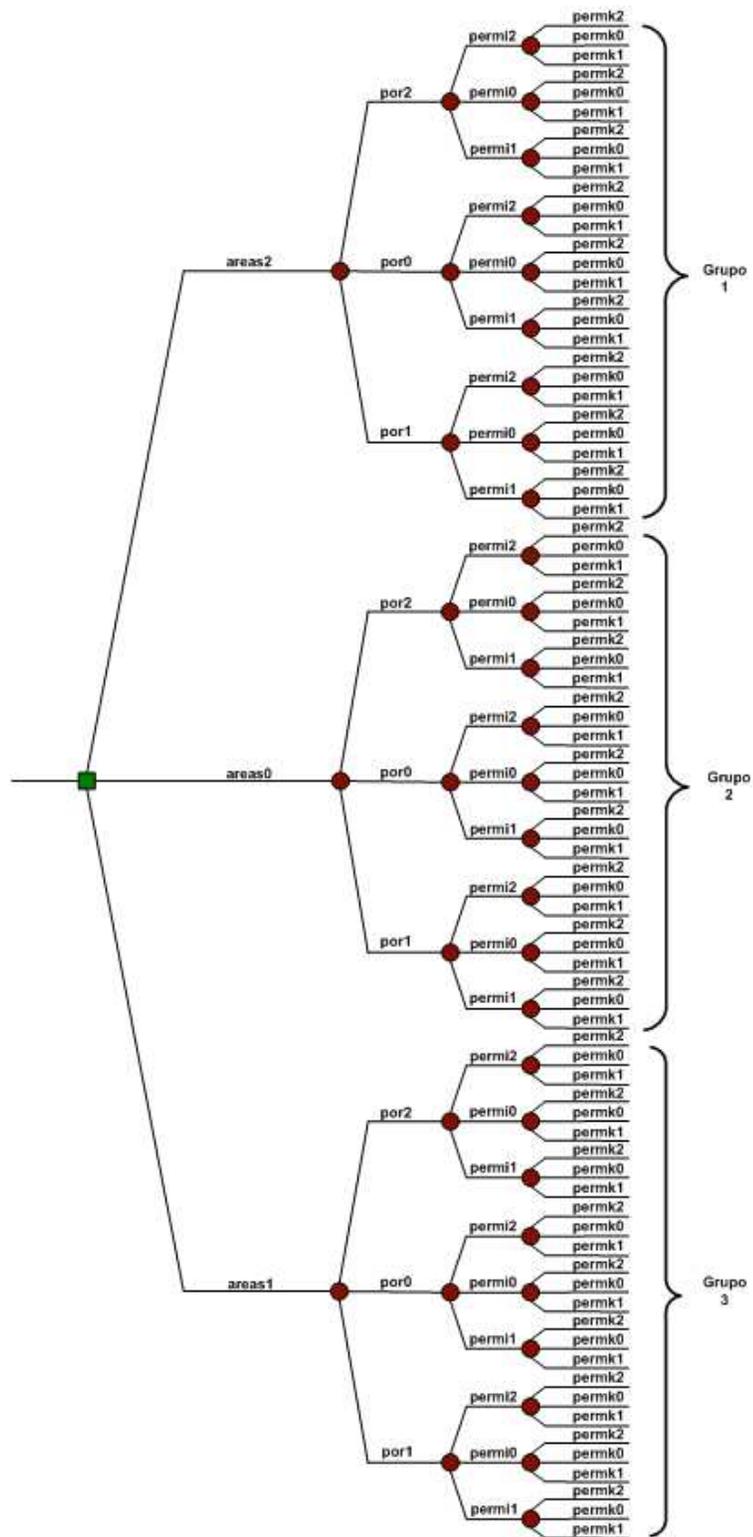


Figura 6.34. Árvore de decisão subdividida em 3 grupos.

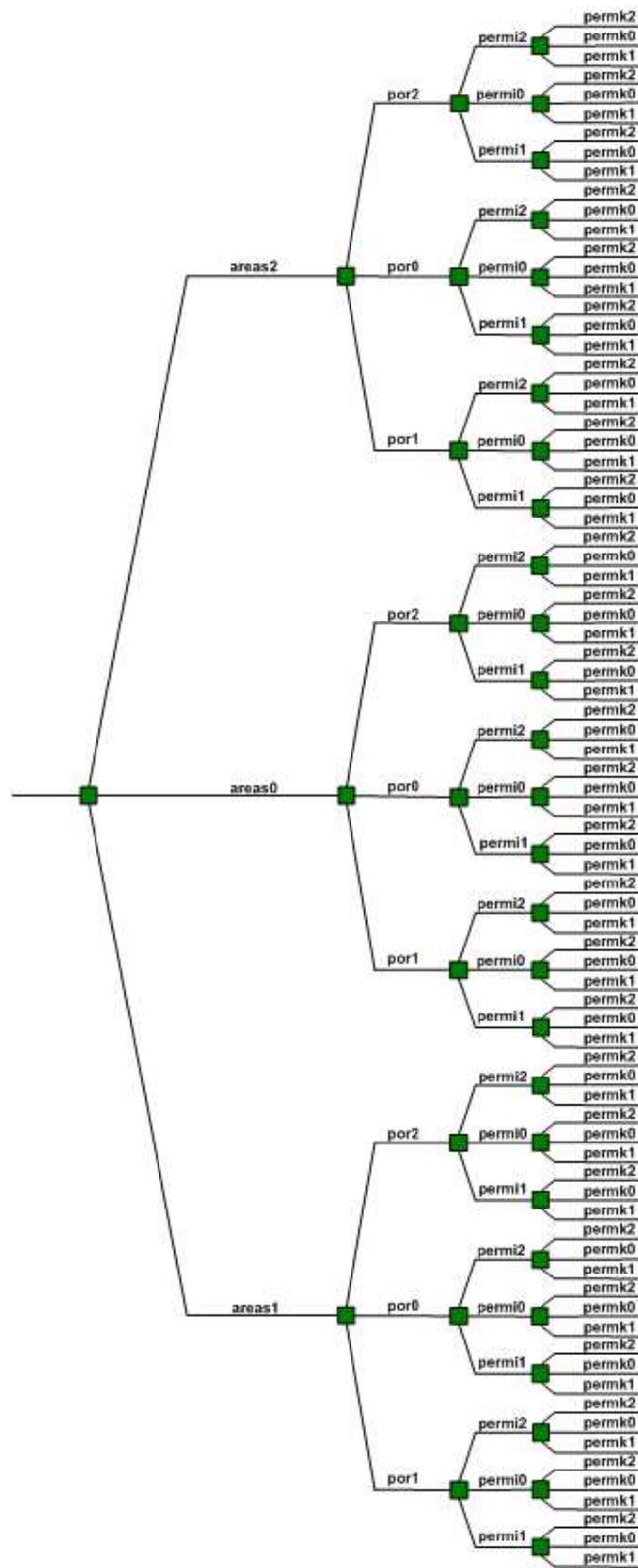


Figura 6.35. Árvore de decisão subdividida em 81 grupos.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho propôs aprimorar a quantificação de VDI aplicada ao desenvolvimento de campos de petróleo, quando se considera diferentes modelos estruturais. Os resultados obtidos mostram uma nova forma de cálculo do  $VME_{SI}$  considerando flexibilidade operacional quanto ao número de poços, fator não considerado nas metodologias de VDI já consolidadas pela literatura. As conclusões mais relevantes estão citadas no Item 7.1 a seguir, bem como os assuntos que ainda devem ser pesquisados como forma de complementar esta metodologia, descritos no Item 7.2.

### 7.1 Conclusões

- A quantificação do VDI necessita de uma modelagem diferenciada do problema quando envolve o modelo estrutural como atributo incerto. No início do desenvolvimento de campos de petróleo, a diferença entre o tamanho dos reservatórios é um dos principais responsáveis pelo valor da informação, indicando que as informações referentes ao atributo são de grande valia e compensatórias frente aos custos de aquisição. Entretanto, o valor é menor quando se considera flexibilidade operacional futura, exemplificada neste trabalho pela flexibilidade no número de poços.
- A respeito da incorporação de flexibilidade operacional neste trabalho:
  - Torna o cálculo do VDI mais coerente com o problema físico encontrado em um campo real quando se deixa de investir nos poços secos à medida que o campo é desenvolvido sem informação, o que não ocorre na abordagem tradicional. Deste modo, é proposto para a quantificação do VDI o emprego de uma estratégia de produção flexível ao invés de uma estratégia fixa nos casos sem informação.

- Na adoção de uma estratégia de produção flexível no desenvolvimento sem informação, propõe-se que o foco das perdas do projeto seja alterado do número de poços secos dos modelos para o dimensionamento sub ou superestimado da plataforma de produção. A flexibilidade é considerada no número de poços e não nos investimentos iniciais do campo, o que acaba sendo responsável pelo valor da informação.
- O número de poços secos adicionados para a correção final dos modelos pessimista, provável e otimista foi proposto especificamente para este trabalho, mas podem ser alterados de acordo com cada caso específico de acordo com uma função-objetivo pré-estabelecida.
- A aplicação de um procedimento automatizado de otimização da estratégia de produção apresentou as seguintes vantagens frente a um processo manual:
  - Aumento do número de modelos simulados e otimizados em um período relativamente curto de tempo e com uma quantidade razoável de simulações, o que colabora para uma precisão maior do VDI;
  - Teste do potencial de produção de todas as regiões do reservatório;
  - Teste e retirada de todos os poços produtores e injetores de pior desempenho;
  - Dimensionamento iterativo da plataforma de produção conforme o número de poços resultantes dos modelos durante os testes de retirada dos poços, o que contribui para um VPL mais preciso;
  - 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, possibilitando o método da árvore completa.
- Sobre as configurações de cronogramas utilizadas:
  - Em ambos os exemplos estudados, o cronograma de perfuração de poços 2.1 foi responsável pelos maiores VPL em todos os modelos. No entanto, isto não significa que os testes dos poços devem ser limitados apenas para esta configuração. É necessário investigar e confirmar a continuidade deste padrão de cronograma em outros casos.
  - A opção de abertura dos poços segundo o desempenho que maximizou o VPL dos modelos não permaneceu constante em todos os casos, o que mostra a relação de

produtividade/injetividade de acordo com as características petrofísicas de cada reservatório.

- Existe uma relação de dependência entre o tamanho da estrutura do reservatório, o número de poços e o sistema de produção, o que altera significativamente os valores monetários esperados em cada modelo. Quanto melhor for a determinação destes valores, mais preciso torna-se o VDI do projeto.
- A metodologia proposta por este trabalho é importante para mostrar que a automatização do processo de otimização da estratégia pode ser aplicada nas metodologias de VDI, de forma consistente e viável, para testar as diversas opções de estratégias disponíveis, o que contribui para um processo de cálculo do valor da informação mais preciso e confiável.
- É importante nas decisões relacionadas à aquisição de informação não observar apenas o VME (ou a diferença entre VME), mas também a variação de risco, através da curva de risco, realizando assim uma análise conjunta entre estes critérios. Há relatos na literatura onde os VME dos modelos foram iguais, porém apresentaram riscos diferentes (Hayashi, 2005).

## **7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Alguns temas que surgiram e não puderam ser abordados no decorrer do desenvolvimento desta dissertação são mencionados e sugeridos para trabalhos futuros:

- A metodologia proposta neste trabalho é aplicada apenas em casos sintéticos como forma de apresentá-la e validá-la. Nos trabalhos futuros recomenda-se a aplicação em um caso já conhecido para comparação dos resultados entre a metodologia tradicional de VDI e a sugerida por este trabalho.
- O conceito de injetividade aplicado a este trabalho considera os melhores poços injetores aqueles que injetam mais água, ou seja, admite-se que a água injetada possui uma boa eficiência no varrido do óleo do reservatório. No entanto, é preciso reconsiderar o conceito de injetividade proposto por Ravagnani *et al.* (2009) pois nem sempre os poços que injetam mais podem ser os melhores poços. Há possibilidade de produção antecipada de água e formação de cones, dois fatores indesejáveis na produção de óleo.

- Neste trabalho, considerou-se o preenchimento completo do campo por poços e a retirada daqueles com pior desempenho para a definição da estratégia de produção, sem mudança no posicionamento destes. É possível utilizar esta metodologia para alcançar o número ótimo de poços nos modelos e, posteriormente, para um refinamento maior da estratégia de produção, outros métodos automatizados podem ser utilizados para determinar a alocação ótima dos poços, como o uso de algoritmo genético, busca harmônica, método de colônia de formigas etc.
- Com relação ao cronograma de perfuração dos poços, caso um padrão de configuração se confirme em outros trabalhos, sugere-se a limitação dos testes para esta configuração, o que implica na redução do número total de simulações e a possibilidade de otimização da estratégia em um maior número de modelos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, September/October, 2002.

BRATVOLD, R. B., BICKEL, J. E., LOHNE, H. P., **Value of Information in the Oil and Gas Industry: Past, Present, and Future.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A., SPE 110378, November, 2007.

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, Calgary, Canada, June, 2003.

DEMIRMEN, F., **Use of “Value of Information” Concept in Justification and Ranking of Subsurface Appraisal.** SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., SPE 36631, October, 1996.

DUNN, M. D., **A Method to Estimate the Value of Well Log Information.** SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Washington, U.S.A., SPE 24672, October, 1992.

EVANS, R., **Decision Analysis for Integrated Reservoir Management.** SPE European Petroleum Conference, Paris, France, SPE 65148, October, 2000.

FLORIS, F. J. T., PEERSMANN, M. R. H. E., **E&P Decision System for Asset Management – A case study.** SPE European Petroleum Conference, Paris, France, SPE 65146, October, 2000.

GAARENSTROOM, L., **The Value of 3D Seismic Information in Field Development.** SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Houston, Texas, U.S.A., SPE 13049, September, 1984.

GERHARDT, J. H., HALDORSEN H. H., **On the Value of Information**. Offshore Europe 89, Aberdeen, SPE 19291, September, 1989.

GRAYSON Jr., C.J., **Decisions Under Uncertainty: Drilling Decisions by Oil and Gas Operators**. Boston, MA: Harvard Business School, Division of Research, 1960.

HASKETT, W. J., **Optimal Appraisal Well Location Through Efficient Uncertainty Reduction And Value of Information Techniques**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., SPE 84241, October, 2003.

HAYASHI, S. D., **Valor da Flexibilização e Informação em Desenvolvimento de Campo por Módulos**. Campinas, 2006. 118pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2006.

LIGERO, E. L., RISSO, V. F., SCHIOZER, D. J., **Análise Econômica da Redução de Incertezas Geológicas de Reservatórios de Petróleo**. Revista Brasileira de Geociências, Vol. 38, n.1 – Suplemento: Geologia e Exploração de Petróleo, pp106-116, Março, 2008.

LOHRENZ, J., **Net Values of Our Information**. JPT – Journal of Petroleum Technology. Volume 40, Number 4. pp. 499-503. Abril, 1988.

MASCHIO, C., SCHIOZER, D. J., **Ajuste de Histórico Assistido Usando Métodos de Otimização de Busca Direta**. Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, Brasil, Outubro, 2004.

MEZZZOMO, C. C., **Otimização de Projetos de Desenvolvimento Integrada à Análise de Risco**. Campinas, 2005. 156pp. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

MIAN, M. A., **Project Economics and Decision Analysis – Volume II: Probabilistic Models**. PennWell Corporation, Tulsa, Oklahoma, 2002, 411pp.

NEVES, F. R., **Análise da Influência de Indicadores Econômicos na Escolha da Estratégia de Produção**. Campinas, 2005. 129pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

NEWENDORP, P. D., SCHUYLER, J., **Decision Analysis for Petroleum Exploration**. 2<sup>nd</sup> Edition. Planning Press, Colorado, U.S.A, 2000, 606 pp.

NOGUEIRA, P. B., **Metodologia de Otimização Probabilística de Estratégias de Produção Baseada em Algoritmos Genéticos**. Campinas, 2008. 124pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

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, February, 2003.

RAMSEY, F.P., **Truth and Probability**. In: Philosophical Papers, ed. D.H. Mellor, 52-94, Cambridge, England. Cambridge University Press, 1926.

RAVAGNANI, A. T. S. G., **Avaliação Econômica de Projetos de E&P**. Unisim On-line, Ano III, nº 23, jan. 2008. Disponível em <<http://www.unisim.dep.fem.unicamp.br/online/UNISIM-ON-LINE-N23.PDF>>. Acesso em: 01/11/2010.

RAVAGNANI, A. T. S. G., MAZO, E. O. M, SCHIOZER, D. J., **A Case Study of the Structure of the Process for Production Strategy Selection**. Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia - CILAMCE, Novembro, Búzios, Brasil, 2009.

ROSE, P. R., **Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures.** AAPG Methods in Exploration Series, nº 12, 2001, 164pp.

SANTOS, J. A. M., **Estudo da Influência da Estratégia de Produção em Análise de Risco Aplicada ao Desenvolvimento de Campos de Petróleo.** Campinas, 2002. 124pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

SAPUTELLI, L., LUJAN, L., GARIBALDI, L., SMYTH, J., UNGREDDA, A., RODRIGUEZ, J., CULLICK, A.S., **How Integrated Field Studies Help Asset Teams Make Optimal Field Development Decisions.** SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting, Bakersfield, California, U.S.A., SPE 110250, March-April, 2008.

SCHLAIFER, R., **Probability and Statistics for Business Decisions.** New York, NY: McGraw-Hill Book Company Inc., 1959.

SCHUYLER, J., **Risk and Decision Analysis in Projects.** 2<sup>nd</sup> Edition. Project Management Institute Inc., Pennsylvania, U.S.A., 2001, 259 pp.

SILVA, F. R. C., COSTA, A. P. A., **Utilização de Modelos Representativos na Tomada de Decisão do Desenvolvimento Complementar em Campo Offshore.** Revista Petro&Química, Ed. 315, 2009, pp. 74-79.

SUSLICK, S. B., SCHIOZER, D. J., **Risk Analysis Applied to Petroleum Exploration and Production: An Overview.** Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 44, Issues 1-2, pp. 1-9, October, 2004.

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

XAVIER, A. M., **Análise do Valor da Informação na Avaliação e Desenvolvimento de Campos de Petróleo**. Campinas, 2004. 157pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

## ANEXO I

### Inserção de Palavras-chave no Arquivo de Simulação (\*.dat)

As palavras-chave devem ser inseridas no arquivo de simulação para a leitura dos programas e possibilitar a otimização da estratégia de produção. Podem ser divididas em duas etapas:

- Palavras-chave que serão lidas pelo UNIPAR-MAI e CMG-IMEX.

O primeiro passo é determinar quais os atributos incertos que serão analisados e onde se encontram dentro do arquivo de entrada do simulador. No segundo exemplo do trabalho, foi analisado o modelo estrutural, porosidade, permeabilidade horizontal e vertical. Encontrando os dados do atributo incerto a ser escolhido no (\*.dat), deve-se inserir (\*\*MAI\_INCLUDE 'atributo') após os dados numéricos deste atributo. Exemplo: o modelo estrutural é chamado de *areas* e porosidade é chamada *por*. Portanto, escreve-se **\*\*\*MAI\_INCLUDE 'areas'** e **\*\*\*MAI\_INCLUDE 'por'** no arquivo de entrada, como mostra a Figura A.1. O mesmo é feito para a permeabilidade horizontal (*permi*) e permeabilidade vertical (*permk*).

```
*****
** RESERVOIR DESCRIPTION SECTION **
*****

*GRID *CART 20 55 6

*KDIR *DOWN
*DI *CON 240
*DJK *CON 160
*DK *CON 5

*DEPTH 1 1 1 3667.0

**$ Property: NULL Blocks Max: 1 Min: 1
**$ 0 = null block, 1 = active block
NULL CON 1

***MAI_INCLUDE 'areas'

*POR *ALL
0.1119
0.0669
0.0673
0.0566
0.0553

***MAI_INCLUDE 'por'
```

**Dados Modelo Estrutural**

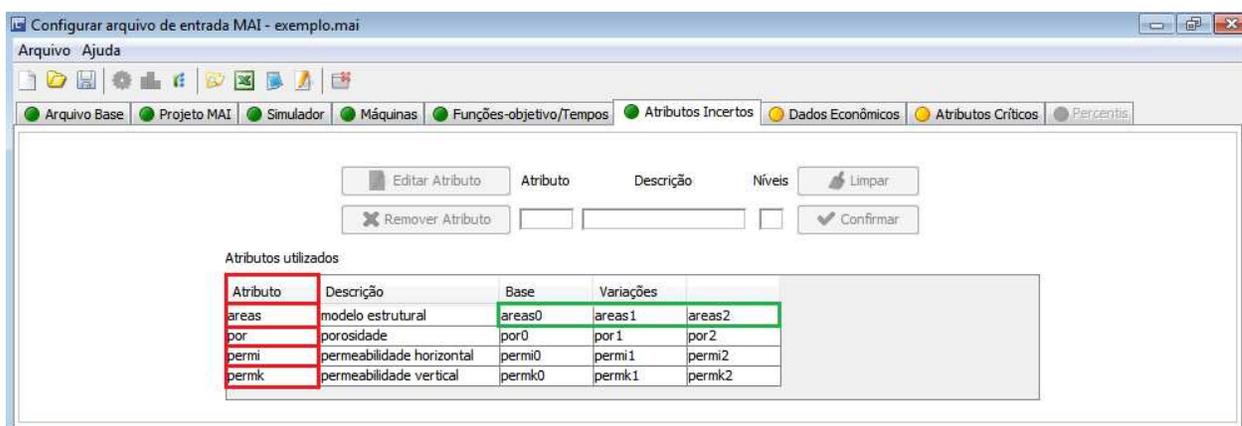
**Dados Porosidade**

**Include** ←

**Include** ←

Figura A.1. Descrição de palavras-chave do MAI no arquivo de entrada do simulador.

Quando o MAI faz a leitura do arquivo de entrada, as palavras-chave são substituídas por valores encontrados dentro de outros arquivos (chamados de *include* (\*.inc)) que devem ser criados pelo usuário. Vale lembrar que ‘atributo’ deve ter o mesmo nome dado para o atributo incerto a ser inserido posteriormente no MAI, como mostra o quadrado vermelho da Figura A.2. Na elaboração do projeto do MAI, os arquivos necessários para simulação (\*.dat) e (\*.inc) devem estar na mesma pasta onde será criado o projeto ou o programa indicará erro. Os nomes dos arquivos includes utilizam os índices 2 para o modelo pessimista, 0 para o modelo provável e 1 para modelo otimista, como mostra o quadrado verde.



**Figura A.2.** Exemplo da inserção dos atributos incertos no MAI.

Esses arquivos include contêm os chamados multiplicadores (\* MOD \* ‘valor’) que alteram os dados de entrada do modelo base, gerando os modelos de simulação para análise através de diferentes combinações de atributos. Exemplo: o modelo provável sempre possui no include o valor \* MOD \* 1.0. Para gerar o modelo otimista de porosidade, com valor de 20% maior que o modelo provável, basta escrever dentro do arquivo por1.inc, \* MOD \* 1.2. O mesmo vale para gerar o modelo pessimista de porosidade, com valor 20% menor que o modelo provável, ou seja, basta fazer o arquivo por2.inc e escrever dentro \* MOD \* 0.8.

O número de arquivos include é igual à quantidade de atributos incertos vezes o número de níveis de incerteza; no caso deste trabalho, três níveis para quatro atributos incertos, correspondendo a doze arquivos. A combinação do número de atributos incertos e níveis de incerteza determina a quantidade de modelos de simulação a serem gerados, sendo igual à quantidade de níveis incertos elevado ao número de atributos incertos, ou seja,  $3^4$  modelos = 81 modelos de simulação.

- Palavras-chave a serem lidas pelo algoritmo

Como o funcionamento do algoritmo de otimização de estratégia se baseia na retirada de poços do arquivo de entrada, as modificações devem ser feitas na parte onde estão as definições dos poços, como indicadas no exemplo da Figura A.3.

Neste exemplo há apenas um poço produtor e um injetor na lista de poços. Os nomes dos poços tem que ser exatamente como descritos nos quadrados vermelhos da figura, ou seja, ‘PROD001’ para produtores e ‘INJ001’ para injetores. Os números foram definidos com três algarismos para poder contemplar casos onde com o preenchimento do número de poços ultrapassasse 100 poços.

Ao final da descrição de cada poço produtor e injetor é necessário incluir o comando de fechamento do poço, exatamente como destacado nos quadrados azuis. Após o término de inclusão do comando de fechamento do último poço e antes do início dos tempos de simulação, é necessário incluir o comando de abertura de todos os poços inseridos anteriormente, escritos da mesma forma indicada pelo quadrado verde.

Nessa preparação para a leitura do algoritmo não importa o número de poços. Importa apenas que estejam os nomes dos poços produtores e injetores escritos corretamente, os comandos de fechamento ao final de cada poço e posteriormente a lista de comando de abertura de cada poço inserido esteja antes dos tempos de simulação. Essas palavras-chave descritas acima são essenciais ao funcionamento do algoritmo, na determinação da estratégia ótima de produção.

```

*****
**          WELL AND RECURRENT DATA SECTION          **
*****

*RUN

*DATE 2000 5 22
**$
WELL 'PROD001'
PRODUCER 'PROD001'
OPERATE MAX STL 900. CONT
OPERATE MIN BHP 1000. CONT
MONITOR WCUT 0.9 SHUTLAYER
MONITOR MIN STO 10. SHUTIN
** K FF
**$ rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.156 0.37 1. 0.
PERF GEO 'PROD001'
**$ UBA ff Status Connection
1 2 1 1. OPEN FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
1 2 2 1. OPEN FLOW-TO 1
1 2 3 1. OPEN FLOW-TO 2
SHUTIN 'PROD001'

WELL 'INJ001'
INJECTOR MOBWEIGHT 'INJ001'
INCOMP WATER
OPERATE MAX STW 900. CONT
OPERATE MAX BHP 41000. CONT
** K FF
**$ rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.156 0.37 1. 0.
PERF GEO 'INJ001'
**$ UBA ff Status Connection
2 4 4 1. OPEN FLOW-FROM 'SURFACE' REFLAYER
2 4 5 1. OPEN FLOW-FROM 1
2 4 6 1. OPEN FLOW-FROM 2
SHUTIN 'INJ001'

OPEN 'PROD001'
OPEN 'INJ001'

TIME 31
TIME 61
TIME 92
.
.
.

```

**Figura A.3.** Exemplo de preparação do arquivo de entrada dos poços.

## ANEXO II

### Dados de Entrada do Algoritmo

#### 1. Configuração do arquivo de projeto do MEC

Abrindo o UNIPAR-MEC, ao clicar no item *Configurar arquivo de entrada*, abre-se uma janela com os seguintes itens listados. As configurações a serem executadas em cada um desses itens estão descritas a seguir.

- Projeto MEC: Os nomes do arquivo e título do projeto devem ser *Otimizacao*.
- Simulador: Selecione o simulador de fluxo IMEX.
- Filas
- Arquivos de simulação: Em *Arquivos a serem simulados*, deixe apenas *CasoModificado.dat*.
- Dados Econômicos: Incluir apenas o arquivo *otimizacaoestrategia.secfin*
- Funções-objetivo/Tempos: Selecione o tempo de simulação desejado.

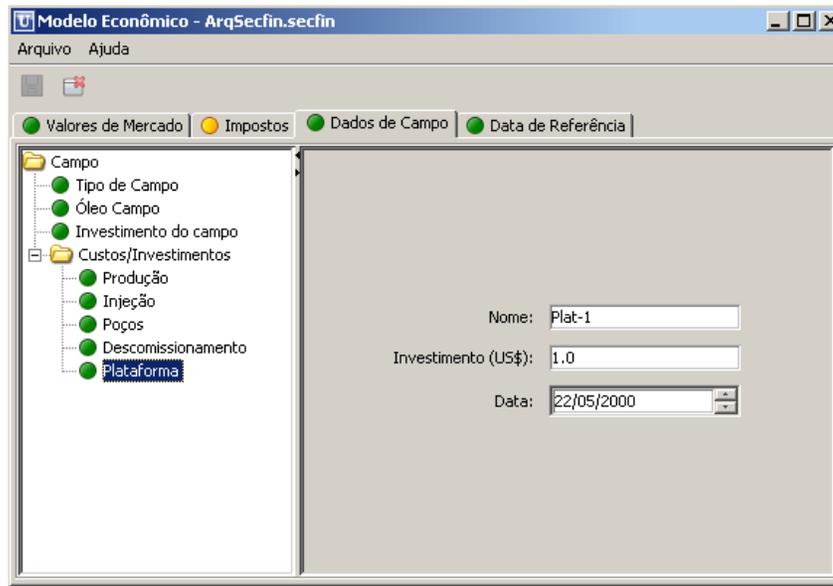
Finalizadas as etapas acima, salve o arquivo como *Otimizacao.mec*. Esse arquivo não precisa ser mais alterado, serve para a simulação de qualquer modelo estrutural incerto. Um detalhe: é necessário criar dois arquivos texto com os nomes *CasoModificado.dat* e *otimizacaoestrategia.secfin* na pasta apenas para configuração do arquivo de projeto; após isso pode descartá-los.

É importante frisar que os nomes dos arquivos de projeto e econômicos não podem ser alterados; caso contrário, o algoritmo indicará erro.

#### 2. Configuração do arquivo econômico ArqSecfin.secfin

Esse arquivo contém os parâmetros econômicos definidos pelo usuário, onde é possível editar alguns valores através do MEC. A única alteração necessária para esse arquivo é o custo da plataforma de produção, que deve ter o valor *1*, como mostra a Figura A.5. Esse arquivo será

utilizado pelo algoritmo para o cálculo econômico e o atualizará gerando outro arquivo ao final da simulação, que conterà o custo atualizado da plataforma de produção.



**Figura A.5.** Preparação do arquivo de modelo econômico (\*.secfin).