

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DE MALHAS DE
COMPLETAÇÃO INTELIGENTE EM POÇOS DE PETRÓLEO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE PARA
OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

ALESSANDRA RODRIGUES DA SILVA

RECIFE, JUNHO / 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DE MALHAS DE
COMPLETAÇÃO INTELIGENTE EM POÇOS DE PETRÓLEO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE PARA
OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

ALESSANDRA RODRIGUES DA SILVA

Orientador: Prof. Enrique Andrés López Droguett, PhD

RECIFE, JUNHO / 2004



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

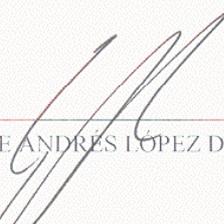
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE
ALESSANDRA RODRIGUES DA SILVA

**“ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DE MALHAS DE COMPLETAÇÃO
INTELIGENTE EM POÇOS DE PETRÓLEO”.**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera a candidata ALESSANDRA RODRIGUES DA SILVA **APROVADA.**

Recife, 01 de junho de 2004.


Prof. ENRIQUE ANDRÉS LOPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)


Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)


Prof. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, PhD (UFPE)

"Qualquer pessoa pode começar, mas apenas os ousados terminarão."

(Napoleon Hill)

À meus pais, **Áurea e João**,
por todo amor, paciência e incentivo
dedicado em toda minha existência.

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais e minha irmã Andréa, pela base familiar forte que temos.

À Fábio, pela paciência e apoio nas horas mais difíceis.

Ao meu futuro cunhado Frederico, tio, tia, primas e primos e àqueles poucos e grandes amigos, pela paciência devido ao afastamento necessário ao empreendimento desta jornada.

Ao meu orientador Prof. Enrique López Droguett, pela oportunidade de realizar este trabalho sob sua orientação.

Ao mestre Carlos Magno Couto Jacinto pela generosidade e paciência ao me transferir conhecimentos em Engenharia de Poço de Petróleo.

Ao Prof. Fernando Campello de Souza pela oportunidade de realizar este trabalho nesta área quantitativa.

Aos integrantes do RISCTEC, pelo apoio, incentivo e presteza dispensada.

E a todos que fazem PPGEP/UFPE, pela colaboração e aporte necessário para a realização desta pesquisa.

Obrigada a todos!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação de malhas de Completação Inteligente (CI) em poços de Petróleo, com relação à disponibilidade do sistema usando Modelos Markovianos.

Em virtude de se tratar de uma nova tecnologia, ainda em fase de desenvolvimento, as taxas de transição dos Modelos Markovianos das malhas de CI serão estimadas em situação de elevada incerteza devido a escassez de dados. No estudo de caso proposto tais taxas serão obtidas por inferência Bayesiana, a partir de diversas fontes de dados, através de bancos de dados genéricos de confiabilidade, opinião de especialistas e dados operacionais.

Serão analisadas duas configurações de malhas denominadas A e B, diferindo na quantidade de dispositivos com redundância. O desgaste dos equipamentos/subsistemas das malhas será incorporado no modelo Markoviano via missões de múltiplas fases. Com a utilização da flexibilidade fornecida por Markov no tratamento de múltiplos estados de um mesmo subsistema, e o tratamento do desgaste via missões de múltiplas fases, podem-se identificar os subsistemas mais prováveis na contribuição da indisponibilidade do sistema.

Após a simulação para obtenção das métricas de confiabilidade e disponibilidade, bases para avaliação e comparação das configurações, serão obtidas conclusões, bem como sugestões para o contínuo aprimoramento do desempenho de sistemas como o de análise.

ABSTRACT

This research aims to model and simulate the availability of intelligent completion systems in oil wells. To reach this goal hybrid modeling frameworks comprised of Markovian process and Bayesian inference will be employed.

Due to the fact that it is a new technology, still in a development stage, the rates of transitions in Markovian Models of meshes of intelligent completion will be estimated under a high level of uncertainty. Such rates will be obtained by Bayesian inference, using evidence from generic reliable data bases, engineering judgements and field data.

Two systems configurations, levels called A and B, will be analysed; the two configurations differ primary interns of redundancy. The wearing out of equipments/subsystems of the meshes will be treated through missions of multiple phases. Using the flexibility given by Markovian treatment of multi-states of a same subsystem, and the treatment of the wearing out by phased-missions, it is possible to identify the subsystems that provide the most relevant contribution to the overall system availability.

After the simulation to obtain the reliability metrics, used to the avaliation and comparison between configurations, conclusions will be obtained as well as the suggestions for the continuous development and improvement of availability of intelligent completions systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Estrutura do Trabalho	3
2 BASE CONCEITUAL	4
2.1 Conhecimentos Gerais sobre Petróleo	4
2.1.1 Petróleo no Brasil e no mundo	4
2.1.2 Desenvolvimento de um campo de petróleo.....	8
2.1.3 Poço de petróleo	12
2.2 Completação	17
2.2.1 Definição	18
2.2.2 Completação Convencional	21
2.2.3 Completação Inteligente (CI).....	28
3 METODOLOGIA APLICADA	37
3.1 Confiabilidade de sistemas	37
3.1.1 Análise da confiabilidade de sistemas	37
3.1.2 Definição	39
3.1.3 Análise de sistemas	43
3.1.4 Confiabilidade de Malhas CI	44
3.2 Análise de falhas em sistemas	47
3.2.1 Falhas Dependentes.....	47
3.2.2 Falhas de Causa Comum	48
3.3 Disponibilidade de Sistemas.....	49
3.3.1 Definição	50
3.4 Modelagem via Processos de Markov	51
3.4.1 Processos estocásticos	52
3.4.2 O Modelo de Markov	52
3.5 Metodologia Bayesiana	62
3.5.1 Interpretação de Probabilidade.....	63
3.5.2 Teoria Bayesiana	63
3.5.3 Teorema de Bayes	65
3.5.4 Tratamento de dados	66
3.5.5 Pares conjugados	68
3.5.6 Tratamento de dados de populações homogêneas	70
3.5.7 Tratamento de dados de populações não homogêneas.....	72
3.5.8 Mistura de funções verossimilhanças.....	75
3.5.9 Utilização de Bayes e Markov na modelagem da malha de CI.....	83
4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA MALHA DE CI	89
4.1 Aplicação da Metodologia ao problema em estudo.....	89
4.1.1 Tratamento da degradação de sistemas	91
4.1.2 Condições sobre a modelagem.....	92
4.2 Caracterização e modelagem das malhas de CI.....	94

4.2.1 Configuração da malha A.....	94
4.2.2 Tratamento da configuração da malha A	95
4.2.3 Simulador utilizado para análise das malhas – Redat plus	102
4.2.4 Simulação da Malha A	109
4.2.6 Configuração da Malha B	118
4.2.7 Tratamento da configuração da malha B	119
4.2.8 Comparação dos resultados obtidos das Malhas A e B.....	133
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
5.1 Conclusões.....	137
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.01 – Plataforma Fixa De Petróleo</i>	10
<i>Figura 2.02 – Plataforma Auto-Elevatória North Star I.....</i>	10
<i>Figura 2.03 – Plataforma Semi-Submersível</i>	11
<i>Figura 2.04 – Navio Sonda Sc Lancer.....</i>	11
<i>Figura 2.05 – Plataformas Tension Leg.....</i>	12
<i>Figura 2.06 – Tipo De Poço Direcional 1.....</i>	15
<i>Figura 2.07 – Tipo De Poço Direcional 2.....</i>	16
<i>Figura 2.08 – Tipo De Poço Direcional 3.....</i>	16
<i>Figura 2.09 – Tipo De Poço Horizontal.....</i>	16
<i>Figura 2.10 – Tipo De Poço Multi-Lateral</i>	17
<i>Figura 2.11 – Completação Convencional.....</i>	22
<i>Figura 2.12 – Malha Completação Inteligente</i>	29
<i>Figura 2.13 – Monitoração Completação Inteligente</i>	30
<i>Figura 2.14 – Monitoração Completação Inteligente</i>	31
<i>Figura 2.15 – O Futuro da Completação Inteligente.....</i>	36
<i>Figura 3.01 – Função Confiabilidade</i>	40
<i>Figura 3.02 – Comparação Entre Configurações Distintas Função Confiabilidade</i>	40
<i>Figura 3.03 – Função Densidade Probabilidade (FDP)</i>	41
<i>Figura 3.04 – Curva da Banheira</i>	42
<i>Figura 3.05 – Gráfico Análise de Falha de um Sistema</i>	49
<i>Figura 3.06 – Exemplo de Diagrama De Markov</i>	55
<i>Figura 3.07 – Diagrama de Markov modelo esquemático.....</i>	84
<i>Figura 4.01 – Técnica de Contorno da Explosão de Estados Combinação de Estados Similares</i>	91
<i>Figura 4.02 – Degradação das Malhas de CI.....</i>	92
<i>Figura 4.03 – Diagrama de Blocos da Malha A</i>	96
<i>Figura 4.04 – Diagrama de Markov da Malha A.....</i>	97
<i>Figura 4.05 – Distribuição a posteriori Conjugada dos parâmetros da variabilidade populacional</i>	106
<i>Figura 4.06 – Parâmetros de Variabilidade populacional</i>	107
<i>Figura 4.07 – Gráfico exemplo da FDP em Função do Tempo de Falha.....</i>	108
<i>Figura 4.08 – Probabilidade de Falhas da Malha A</i>	112
<i>Figura 4.09 – Disponibilidade da Malha A.....</i>	113
<i>Figura 4.10 – Número de Falhas da Malha A.....</i>	113
<i>Figura 4.11 – Número de Reparos da Malha A</i>	114
<i>Figura 4.12– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (Umbilical)</i>	115
<i>Figura 4.13 – Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (Coluna)</i>	115
<i>Figura 4.14– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (ANM)</i>	116
<i>Figura 4.15– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (IPR – Válvula Elétrica e sensores Temperatura e Pessão)</i>	117
<i>Figura 4.16– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (FMU)</i>	117
<i>Figura 4.17 – Diagrama de Blocos da Malha B</i>	120
<i>Figura 4.18 – Diagramas de Markov da Malha B</i>	121

<i>Figura 4.19 – Probabilidade de Falhas da Malha B</i>	127
<i>Figura 4.20 – Disponibilidades da Malha B</i>	128
<i>Figura 4.21 – Número Médio de Falhas da Malha B.....</i>	129
<i>Figura 4.22 – Número Médio de Reparos da Malha B</i>	129
<i>Figura 4.23– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (Umbilical)</i> <i>.....</i>	130
<i>Figura 4.24– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (Coluna)</i> <i>.....</i>	131
<i>Figura 4.25 – Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (FMU)</i>	132
<i>Figura 4.26– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (IPR)...</i>	132
<i>Figura 4.27– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (ANM)</i>	133
<i>Figura 4.28 – Probabilidade de Falha da Malha A x Malha B</i>	135
<i>Figura 4.29 – Disponibilidade da Malha A x Malha B</i>	136

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.01 – Exemplo de estados de um sistema</i>	55
<i>Tabela 3.02 – Pares Conjugados</i>	68
<i>Tabela 3.03 – Mistura de Verossimilhanças</i>	75
<i>Tabela 3.04 – Estados do modelo esquemático</i>	84
<i>Tabela 3.05 – Taxas de transição do modelo esquemático</i>	84
<i>Tabela 3.06 – Dados de Falha do Sistema</i>	88
<i>Tabela 4.01 – Estados da Malha A</i>	98
<i>Tabela 4.02 – Taxas de Transição do Modelo de Markov da Malha A</i>	99
<i>Tabela 4.03 – Dados de Falha do Sistema</i>	103
<i>Tabela 4.04 – Dados de Reparo do Sistema</i>	104
<i>Tabela 4.05 – Estatísticas dos Percentis e Mediana da Taxa de Falha</i>	107
<i>Tabela 4.06 – Dados de Falha do Sistema adquiridas por Bayes</i>	108
<i>Tabela 4.07 – Dados de Reparo do Sistema adquiridas por Bayes</i>	109
<i>Tabela 4.08 - Métricas de Confiabilidade da Malha A</i>	110
<i>Tabela 4.09 – Estados da Malha B</i>	122
<i>Tabela 4.10 – Taxas de Transição do Modelo de Markov da Malha B</i>	123
<i>Tabela 4.11 - Métricas de Confiabilidade da Malha B</i>	126
<i>Tabela 4.12 - Métricas de Confiabilidade das Malha A e B</i>	134

1 INTRODUÇÃO

A todo momento surgem novos produtos e tecnologias em diversas áreas da ciência. Em poços de petróleo, novos conhecimentos e mudanças constantes são a realidade de quem trabalha com um produto cuja palavra-chave é custo. Devido a constantes mudanças no preço do petróleo, hoje se produz em condições dinâmicas para permitir melhor planejamento e administração do reservatório.

O aumento da produção *offshore* e as perspectivas de crescimento de reservas colocam novos desafios na exploração e produção de petróleo. Devido à necessidade de novos recursos e novas tecnologias em processos e produtos para a otimização da produção, surgiu a Completação Inteligente, oferecendo produto e tecnologia para o desenvolvimento de campos de petróleo.

A completação inteligente (CI), tecnologia para controle e monitoração do desempenho de poços durante o seu ciclo de vida, evolui exponencialmente em novos produtos e tecnologia. Atualmente, trabalha-se em campos sensíveis, como águas profundas, com acompanhamento em tempo real da produção de petróleo partindo até de múltiplas zonas, produzindo por controle remoto e com ferramentas de decisão que fornecem dados *on-line* que podem ser usados para análise, diagnóstico e apoio ao desenvolvimento do campo, possibilitando o operador tomar decisões rápidas, aperfeiçoando o desempenho do poço (Dev, 2001).

O principal foco da implantação de malhas de CI para as empresas exploradoras de petróleo (operadores) está na redução de intervenções durante a vida produtiva do poço e no controle e monitoração dos reservatórios em tempo real (Strag, Ansell & Rausand, 2000). A não disponibilidade do poço a cada intervenção acarreta custos elevados com aluguel de sondas (US\$ 750.000), além dos custos da não-produção do petróleo por força da interrupção na produção (US\$ 150.000/DIA) (Borg, 2001).

A CI engloba tecnologia e produtos que estão sendo desenvolvidos para acelerar a produção, reduzir a necessidade de intervenções, trabalhar em geologias complexas, como águas profundas, e ser eficiente para monitorar e controlar remotamente, gerando informações em tempo real (Dev, 2001). A CI surgiu como a oportunidade para mudança na completação e flexibilidade de gerenciamento da produção de reservatórios. Necessitava-se, então, de uma tecnologia que fosse capaz de se adequar às configurações existentes e assegurar a confiabilidade ao sistema.

Devido à escassez de informações que possam viabilizar um alto investimento na aquisição de componentes/subsistemas de monitoração e controle de poços, poucos estudos foram desenvolvidos sobre a confiabilidade destes sistemas. No Brasil, apenas um protótipo de CI encontra-se em fase de testes no sul da Bahia (Susick, 2003).

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação da disponibilidade de malhas de completação inteligente através de uma metodologia híbrida composta de análise Bayesiana e processos Markovianos com Missões de Múltiplas Fases para o tratamento da degradação do sistema.

Por conta da escassez de dados, por ser uma tecnologia em fase inicial de implantação, diferentes fontes de evidência serão utilizadas como a opinião de especialistas, banco de dados de confiabilidade (OREDA, 2002) e dados operacionais. Através da análise Bayesiana, esses dados serão usados para atualizar o estado de conhecimento sobre as taxas de transição dos modelos Markovianos de disponibilidade.

Será desenvolvido um estudo de caso, onde dois cenários distintos com relação à existência de redundância serão modelados e simulados para aquisição das métricas de confiabilidade. Os resultados serão analisados e comparados com finalidade de obter conhecimento em relação à disponibilidade destes sistemas levando em consideração a degradação ocorrida nos componentes/subsistemas da malha.

Os objetivos específicos são:

- revisão bibliográfica dos sistemas de completação e a confiabilidade destes sistemas;
- apresentação da Metodologia adotada, Modelos Markovianos e Metodologia Bayesiana;
- definição do cenário das malhas de CI e obtenção das taxas de transição por intermédio de especialistas da Petrobrás, banco de dados genéricos e dados operacionais;

- descrição do comportamento dinâmico do sistema através de Modelos Markovianos;
- tratamento das taxas de transição através da Metodologia Bayesiana;
- modelagem da degradação das malhas, via processos de missões de múltiplas fases e
- análise dos resultados e comparação das malhas com relação às métricas de confiabilidade.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. Além da introdução, constam a Fundamentação Teórica, Metodologia Utilizada no Trabalho, Modelagem e Simulação da Malha de CI, Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

A Fundamentação Teórica é apresentada no Capítulo 2, onde constarão os conceitos e histórico do Petróleo, Completação Convencional, Completação Inteligente (CI) e alguns conceitos sobre confiabilidade e disponibilidade destes sistemas.

A Metodologia adotada estará presente no Capítulo 3, onde serão apresentados o Modelo Markoviano e a Metodologia Bayesiana, ambos apresentados como ferramentas no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

No Capítulo 4, será apresentada a modelagem e simulação de malhas de completção inteligente, onde será mostrado dois cenários de malhas, desenvolvida toda modelagem, discutidos os resultados e realizada a comparação dos modelos.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho de pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2 BASE CONCEITUAL

A seguir, descreve-se a fundamentação teórica, contemplando conhecimentos gerais sobre o Petróleo (como conceitos básicos, atualidades, histórico), desenvolvimento de um campo e explicações sobre poço de Petróleo. Também são abordados neste capítulo, conceitos básicos de Completação, a Completação Convencional e a Inteligente, e uma revisão bibliográfica com relação a trabalhos de análise de confiabilidade de sistemas CI.

2.1 Conhecimentos Gerais sobre Petróleo

O foco desta seção não será uma abordagem completa em engenharia de poços, mas apenas explicações macro de alguns processos e produtos; um breve histórico e algumas descrições consideradas necessárias para o andamento do trabalho.

2.1.1 Petróleo no Brasil e no mundo

O petróleo é um recurso mineral constituído por uma mistura de compostos químicos orgânicos, resultante de processos físico-químicos sofridos pela matéria orgânica oriunda de resíduos animais e vegetais depositados durante a formação de rochas sedimentares há milhões de anos atrás. Através de efeitos mecânicos (processo de geração), ocorre a migração do petróleo da rocha, chamada de fonte ou geradora, para locais com menores pressões, fluindo entre os poros da rocha até encontrar uma camada impermeável capaz de bloquear seu escapamento (Thomas, 2000).

Os cinco segmentos básicos da indústria do petróleo são: a **exploração**, que consiste na localização da reserva; **exploração**, no desenvolvimento e produção da reserva; o **transporte da produção** obtida da reserva; **refino**, separação da água, óleo, gás e sólidos produzidos, e a **distribuição**, dos produtos finais das estações e refinarias.

A partir do seu refino, são extraídos diversos produtos, como a gasolina, diesel, querosene, gás, óleos combustíveis e lubrificantes, parafinas e compostos químicos que são matérias-primas para toda uma cadeia produtiva que envolve indústrias dos mais diversos setores e atividades (Thomas, 2000).

Embora conhecido desde os primórdios da civilização, o petróleo só passou a ser comercializado no século XVIII. Em 1859, na Pensilvânia, nos Estados Unidos da América, o primeiro poço foi perfurado à procura de petróleo, por Edwin Drake.

A busca pelo óleo de pedra teve início devido ao alto preço dos iluminantes da época, fazendo com que um grupo acreditasse que o produto processado poderia ser queimado em lampiões e ser exportado em quantidade bem maior (Mariot, 2003).

A importância deste recurso foi declarada na Primeira Guerra Mundial. A mecanização dos transportes que equipavam as tropas fez com que o mundo reconhecesse que estava vivendo a era do petróleo, iniciando assim a corrida pelo ouro negro (Mariot, 2003).

No Brasil, a exploração teve início em 1892, mas apenas em 1897, na região de Bofete (SP), foi perfurado o primeiro poço petrolífero do país. O poço teve 488 metros perfurados e dele foram extraídos apenas dois barris de petróleo. Nesta época, o mundo conheceu os primeiros motores à explosão que expandiram as aplicações do petróleo, antes restritas ao uso em indústrias e iluminações públicas e residenciais. Posteriormente, outros poços foram perfurados sem sucesso, até ser descoberto petróleo em Lobato (BA). A partir daí, investimentos foram obtidos para explorações na Bacia do Recôncavo, onde foi descoberta a primeira acumulação comercialmente viável do país, no Campo de Candeias (Lucchesi, 2003).

Atualmente, o petróleo é uma forte diretriz da economia mundial. É a principal fonte de energia do mundo (Ramalho, 2003). Apesar da ciência e da tecnologia estarem constantemente desenvolvendo novas fontes alternativas de geração de energia, ainda não foi encontrada uma alternativa com custos comparáveis ao do petróleo para que possa substituí-lo. A demanda contínua e crescente de energia e a disponibilidade de hidrocarbonetos colocam ainda o petróleo como uma fonte não-renovável da matriz energética mundial para as próximas décadas do século XXI. Neste contexto, altos investimentos são difundidos para se descobrir novas fontes alternativas de energia e otimizar as tecnologias de prospecção, produção e refino de petróleo (Oliveira, 2002).

Este recurso mineral, não renovável e de grande valor econômico, é um insumo de características peculiares. Seu custo técnico de produção varia muito, em função das

características geo-econômicas e geológicas da região produtora, não sendo composto apenas de seu custo técnico de produção. Sobre estes incidem tributos que são particularmente relevantes, no caso dos petróleos de baixo custo técnico de produção. Estes impostos são a mais importante fonte de receita fiscal nos países em desenvolvimento que têm no petróleo seu principal produto de exportação (Oliveira, 2002).

Em alguns países, as empresas petrolíferas são induzidas a programar sua produção em função das necessidades fiscais do governo. Quando o preço do mercado internacional está elevado e a situação fiscal é confortável, as empresas são induzidas a restringir sua produção. O inverso ocorre quando o preço está baixo e a situação fiscal é frágil. Seu preço, a curto prazo, caracteriza forte inelasticidade. Porém, a longo prazo, é bastante substancial (Oliveira, 2002).

Todo ganho excessivo dos produtores a curto prazo traz embutido o risco de perda de mercado a longo prazo, sendo este risco o principal inibidor da ânsia exagerada de ganho dos produtores de petróleo, que percebem na forte dependência de suprimento do petróleo do mundo industrial uma oportunidade para aumentar significativamente o preço deste insumo (Oliveira, 2002).

O consumo, assim como a produção, também está concentrado em poucos países. Os Estados Unidos da América consomem cerca de 25% do petróleo produzido no mundo. Os países europeus e o Japão são responsáveis por cerca de 40% adicionais, isto é, menos de 15% da população mundial ficam com dois terços dos benefícios econômicos da maior riqueza mineral do planeta. A produção de petróleo no Brasil é atualmente de 1,49 milhões de barris/dia de óleo, o equivalente a 63% do petróleo que consome. No cenário mundial, o Brasil ocupa o 16º lugar no *ranking* dos maiores produtores de petróleo do mundo (Oliveira, 2002).

A Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás) foi criada em 1953, pelo presidente Getúlio Vargas, como monopólio estatal de pesquisa e lavra, refino e transporte do petróleo e seus derivados no Brasil (Vogt, 2002). Até 1960, todo o petróleo do país vinha de duas Bacias pequenas. Em 1973, surgiu a primeira crise do petróleo, onde países árabes do Oriente Médio, que asseguravam 60% da produção mundial do composto, entraram em conflito com Israel e cortaram em um quarto o volume produzido, passando o preço do barril de dois dólares para doze dólares. Em virtude desta situação econômica mundial, a Petrobrás partiu à procura de novos poços, ampliando suas pesquisas, descobrindo assim a Bacia de Campos (RJ), composta por

uma séria de poços gigantes, localizada em águas profundas, que responde hoje por 86% das reservas nacionais.

Motivos políticos também foram a causa da segunda crise, a revolução Iraniana, que levou ao poder o Aiatolá Ruhollah Khomeini e provocou uma onda anti-ocidental no Oriente Médio. O preço do barril saltou para quarenta dólares em 1979, e o Brasil, assim como diversos países do mundo, enfrentou grave recessão. Outras crises marcaram as oscilações no preço do petróleo, desde o início dos anos 90, quando o Iraque invadiu o Kuwait e a mais recente em 2003 quando os Estados Unidos da América proclamou guerra ao Iraque (Ramalho, 2003).

O ano de 1994 marcou o fim do monopólio da Petrobrás. Em 1997, foi criada a Agência Nacional do Petróleo (ANP) para regularizar o setor, e em 1999 começaram as licitações para exploração, desenvolvimento e produção (Vogt, 2002).

Incertezas sobre a extensão das reservas atuais de petróleo é um constante incentivo à indústria petroleira na busca constante por novas fontes e técnicas de extração. Nos anos 80, foi especulado que as reservas totais durariam 25 anos, às taxas de consumo daquele tempo. Hoje, que temos maiores taxas de consumo, as reservas atuais devem durar por 40 anos (Lawton, 2003), mas neste momento cresce a procura por novas fontes e novas tecnologias para aprimoramento de novas reservas. Nas atividades mais recentes de exploração e produção em várias regiões do globo, as reservas de petróleo bruto, encontradas em águas profundas e ultraprofundas, apresentam dimensões maiores que as localizadas em terra e em águas rasas. Novos métodos para permitir a exploração destas novas fronteiras da indústria de petróleo estão sendo aprimorados constantemente (Lathan, 2003).

A tecnologia da sísmica tridimensional (3D) permite o exame do solo abaixo da superfície do mar, de forma que formações geológicas, que sejam prováveis reservas, sejam identificadas, diminuindo o custo exploratório e trazendo importantes descobertas de petróleo. Mas a identificação não é o bastante. Precisa-se conferir fisicamente as prováveis reservas. Para este fim, foram desenvolvidos navios para perfuração, que são posicionados via satélite e levam inúmeros equipamentos para perfurar e analisar os poços (Lawton, 2003).

Recentemente foram descobertos, em nove poços em águas profundas e ultraprofundas (*offshore*), reservas de uma média de 30 milhões de barris por poço. O número de poços em terra (*onshore*) que iniciaram produção foi muito maior, mas as

reservas encontradas têm um tamanho menor: uma média de 4 milhões de barris por poço (Lathan, 2003).

A busca pela produtividade energética muitas vezes entra em conflito com a necessidade de preservar o meio ambiente. O impacto ambiental, no caso do petróleo, é inerente a todo processo de produção. A perfuração de um poço ou a instalação de um duto tem conseqüências imediatas para o ecossistema em que se estabelecem, além de vultosos prejuízos ao meio-ambiente quando ocorrem acidentes. As companhias geradoras se preocupam com a proteção ao homem e ao meio ambiente, trabalhando para reduzir alterações no ecossistema e para compatibilizar todas as fases da indústria de petróleo focando a prevenção do meio ambiente e a segurança das pessoas e das instalações, proporcionando melhorias na qualidade de vida (Ramalho, 2003).

A direção do crescente aprimoramento da produção de petróleo e a obtenção de novos recordes de exploração e processamento de derivados são os principais objetivos para o desenvolvimento de estudos na área petrolífera, e os incrementos e métricas de confiabilidade destas novas tecnologias podem fornecer ferramentas para o aprimoramento dos componentes/subsistemas, bem como o apoio à decisão para viabilizar o alto investimento de novas tecnologias.

2.1.2 Desenvolvimento de um campo de petróleo

O desenvolvimento de um campo de petróleo denota um conjunto de operações e investimentos destinados a viabilizar as atividades de produção de um campo de petróleo (Thomas, 2000).

A **fase exploratória**, realizada anteriormente à fase de desenvolvimento, tem como objetivo examinar e identificar prováveis formações petrolíferas. Métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) e métodos sísmicos são utilizados para o mapeamento da região e localização da área de maior probabilidade de acondicionar petróleo. Só após a realização de sondagens pode-se confirmar a existência de petróleo em uma determinada região. E a perfuração desenvolvida para produção só é iniciada se o volume de petróleo justificar os investimentos de infra-estrutura do poço.

A **fase exploratória** engloba técnicas de desenvolvimento e produção de um campo de petróleo, como atividades de perfuração e completação dos poços, instalação

de um sistema de coleta dos fluidos (*manifolds* e linhas flexíveis), construção e instalação de uma unidade de produção (plataforma), instalação de um sistema de escoamento da produção (oleodutos, gasodutos, navios tanque) e um sistema de gerenciamento e logística.

A **perfuração** é a etapa inicial que irá ampliar as fronteiras exploratórias e expandir as reservas de óleo. A viabilidade comercial da exploração de um campo petrolífero depende estrategicamente das técnicas de perfuração e completação utilizadas, pois tais atividades custam em média 50 a 60% do investimento total necessário para ativar a produção do poço (Jacinto, 2002), abordando os aspectos de segurança inerentes à operação. Depois que é extraído, a partir do poço em terra ou no mar, o petróleo é transportado por oleodutos ou por navios petroleiros até os terminais marítimos, que são portos especiais para carga e descarga, e posterior encaminhamento para as refinarias.

Tendo em vista elevados valores concentrados nas fases de perfuração e completação, existe um grande interesse em pesquisas científicas e tecnológicas para otimizar e aperfeiçoar continuamente o desenvolvimento das atividades relacionadas a tal atividade (Jacinto, 2002).

O poço faz a comunicação entre o reservatório e a superfície com o objetivo de otimizar o volume de óleo extraído. O projeto e planejamento do poço contempla várias fases, dentre elas, a análise da técnica mais apropriada para perfuração, perfuração, a cimentação e revestimento do poço, tipo de sonda, unidade de perfuração, os vários equipamentos (brocas, colunas de perfuração e revestimento, ferramentas de monitoração e controle de trajetória do poço, ferramentas de perfilagem, etc.) e a determinação do tipo de fluido utilizado na perfuração (Thomas, 2000).

Segundo Thomas (2000), a perfuração *offshore* (poços marítimos) é realizada através de dois tipos de unidades de perfuração, que são utilizadas de acordo com alguns aspectos: a lâmina d'água, o relevo do fundo do mar, a finalidade do poço, disponibilidade do apoio logístico e, principalmente, a relação custo/benefício. O controle de válvulas que permitem o fechamento do poço, denominado *blowout preventer* (BOP), pode ser localizado na superfície em plataformas fixas, auto-eleváveis, submersíveis e *tension legs*, ou no fundo do mar, conhecidas como unidade flutuantes, como as semi-submersíveis e os navios-sonda.

Thomas (2000) afirma também que toda a produção extraída é enviada para a Unidade Estacionária de Produção (UEP) ou plataforma. De acordo com condicionantes

operacionais, o número de ligações diretas à UEP é realizado por *manifolds*, cuja função é de concentrar óleos. Os *manifolds* operam com o mínimo de ligações diretas para a manutenção da viabilidade econômica. Estas ligações entre poços e *manifolds*, *manifolds* e UEP e poços e UEP são denominadas *bundles*.

As plataformas fixas, conforme representadas na Figura 2.01 a seguir, são preferencialmente utilizadas nos campos localizados em lâminas d'água de até 300 (trezentos) metros. Porém, devido ao seu alto investimento, sua aplicação é indicada para o desenvolvimento de campos já conhecidos, onde vários poços são perfurados.



Figura 2.01 – Plataforma Fixa De Petróleo
(Fonte: Projeto de Estruturas Marítimas USP, 2003)

As plataformas auto-eleváveis, que podem ser visualizadas na Figura 2.02 abaixo, são constituídas basicamente de uma balsa equipada com estruturas de apoio, que acionadas mecânica ou hidráulicamente tocam o fundo do mar projetando o convés à superfície. Em seguida, inicia-se a elevação da plataforma acima do nível da água. São indicadas para trechos com lâmina d'água situadas entre 5 (cinco) a 130 (cento e trinta) metros.



Figura 2.02 – Plataforma Auto-Elevatória North Star I
(Fonte: Shahin, 2003)

As plataformas submersíveis constam de uma estrutura montada sobre um flutuador, sendo indicadas para águas calmas, rios e baías com pequena lâmina d'água.

As plataformas flutuantes, tipo semi-submersíveis e navios-sonda, que podem ser visualizadas respectivamente nas Figura 2.03 e Figura 2.04, movimentam-se dentro de um espaço pré-estabelecido por equipamentos de superfície, devido à ação das ondas, correntes e ventos. Seu posicionamento é através de sistemas de ancoragem ou pelo posicionamento da unidade flutuante. São comumente utilizadas para perfuração de poços exploratórios.



Figura 2.03 – Plataforma Semi-Submersível
(Fonte: Petrobrás, 2000)



Figura 2.04 – Navio Sonda Sc Lancer
(Fonte: SHAHIN, 2003)

As plataformas *Tension Leg*, conforme apresentada na Figura 2.05 abaixo, são usadas para desenvolvimento de campos. Sua estrutura é similar à semi-submersível, diferenciando nos seus apoios ancorados no fundo do mar. O grau de flutuação da plataforma possibilita que os apoios fiquem tracionados, reduzindo movimentos da plataforma.



Figura 2.05 – Plataformas *Tension Leg*
(Fonte: Projeto de Estruturas Marítimas USP, 2003)

As plataformas de petróleo são castigadas constantemente pelas ondas e pelas correntes marítimas que, no fundo do oceano, se movimentam em diversas direções. As diversas linhas de ancoragem, que fixam o equipamento ao solo, e dutos, responsáveis pelo transporte do petróleo e do gás até a superfície, operam em ambientes hostis. Para vencer grandes lâminas de água, que chegam a mais de mil metros de profundidade, e extrair o óleo da crosta terrestre, o projeto dessas plataformas precisa ser submetido a testes rigorosos e de alta precisão.

2.1.3 Poço de petróleo

Segundo Thomas (2000), utiliza-se normalmente a perfuração rotativa em poços de petróleo. Tal atividade é efetuada através da aplicação de um peso e rotação na broca com finalidade de perfurar e destruir a rocha. Um fluido de perfuração é usado para remoção e transporte dos fragmentos da rocha até a superfície, definido de acordo com

o tipo de solo que irá ser perfurado, e bombeado para o interior da coluna de perfuração por meio da cabeça de injeção, retornando à superfície através do espaço anular entre a parede do poço e a coluna. Quando o poço, por algum motivo, se estreita é necessário repassar o trecho. Esta atividade consiste em se reperfurar o poço com uma broca de diâmetro maior que a utilizada para sua perfuração.

Em poços típicos *onshore* (poços terrestres), crava-se no solo o condutor por onde descera a broca, e numa determinada profundidade a mesma é retirada e inserida uma coluna de revestimento de aço, com menor diâmetro em relação à broca. Em seguida é iniciada a cimentação, cujas finalidades são de isolar as rochas atravessadas para permitir o avanço da perfuração com segurança, evitar contaminações de água, controlar pressões, impedir migrações de fluidos e sustentar a estrutura de cabeça do poço.

Em poços *offshore* primeiro desce a base guia temporária por onde se inicia a perfuração com a broca, em seguida, após a retirada da broca, desce o revestimento, para então ocorrer a cimentação. A continuação do processo é similar ao da *onshore*.

Thomas (2000) relata que após a perfuração do poço e antes do seu revestimento, é comum a realização da perfilagem, que consiste na descida de registradores para se medir algumas das propriedades da formação como: resistividade, raios gama, sônico, *caliper*, etc. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente inserida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração, sendo um poço perfurado em diversas fases, caracterizadas pelos diferentes diâmetros de brocas.

Problemas durante a perfuração podem ocorrer por diversos fatores. Destacam-se os mais frequentes: **perda de circulação** ou ausência de retorno, caracterizado com a perda do fluido de perfuração para os espaços porosos, fraturas ou cavernas de formação, durante as operações de perfuração e completação; **prisão da coluna de perfuração** por diferencial de pressão, desmoronamento, embuchamento ou inchamento da argila; **desgaste das brocas**, objetos que impedem o prosseguimento da perfuração (ferramentas, seção da coluna de perfuração, cones de broca, cabos), presos ou caídos no poço; **mudanças de direção do poço** em função de fatores naturais e mecânicos. Influxo indesejável (água, óleo ou gás) e não esperado (*kick*) pode ocorrer da formação para dentro do poço, devido a diminuição de pressão no poço, em formações permeáveis, com relação à pressão de poros de formação (Thomas, 2000).

O *kick* é causado pela falta de ataque ao poço durante as manobras, pistoneio, perda de circulação, peso de lama insuficiente e corte da lama por gás. Quando é detectado, deve-se fechar o poço pelo BOP, circular o fluido invasor para fora do poço, circular um fluido mais denso para controlar o poço, abrir o BOP e voltar a perfurar. O fluxo descontrolado (*blowout*) pode ocorrer na superfície ou sub-superfície (*Underground Blowout*). O controle do *kick* evita que se transforme num *blowout*.

Ao terminar a perfuração, inicia-se a movimentação da sonda para a nova locação. Em poços *onshore*, é conhecida como DTM (Desmontagem, Transporte e Montagem) e consiste na desmontagem da sonda em diversas partes, transportá-la para a nova locação utilizando caminhões ou helicópteros e em seguida montá-la. Em poços *offshore*, é conhecida como DMM (Desmontagem, Movimentação e Mobilização), e consiste na preparação da UPM (Unidade de Perfuração Marítima) para sua movimentação, que é realizada por intermédio de rebocadores ou por propulsão própria, seguindo-se o posicionamento em nova locação.

Segundo Thomas (2000), após a perfuração inicia-se a completação, nova etapa de operações que se destinam a preparar o poço para que produza em condições seguras e econômicas durante sua vida útil. A completação trata da preparação do poço para produção, envolvendo técnicas de isolamento das zonas produtoras e testes de vazão e pressão do poço. Antes de iniciar o processo produtivo, dependendo do potencial produtor do reservatório vinculado às propriedades petrofísicas da rocha e das propriedades dos fluidos do reservatório, há necessidade da utilização de técnicas de estimulação química (acidificação), mecânica (fraturamento hidráulico) ou químico-mecânica, para se aumentar a produtividade do poço.

A produção de petróleo envolve a monitoração e garantia do fluxo de óleo do reservatório até a superfície e o envio para os sistemas externos de transporte, ou armazenagem. Na linha de produção, são estudadas as propriedades de fluidos e comportamento de fases, fluxo de óleo no reservatório, escoamento multifásico no poço e nos dutos de produção, instalações terrestres e marítimas de produção, separação de óleo, gás e água, métodos de elevação artificial (bombeio de petróleo no caso de poços sem surgência natural), automação e controle de processos, sistemática de projeto de desenvolvimento de campo e gestão de produção (Thomas, 2000).

Com relação ao tipo, os poços podem ser designados verticais, quando geralmente não ultrapassam 5° de inclinação, pois apesar de todo controle de alinhamento empenhado não há poço rigorosamente vertical. Poços que se desviam da

vertical e se afastam do objetivo desejado são denominados tortuosos e dificultam o mapeamento de superfície. Os principais motivos da existência de poços tortuosos são dificuldades encontradas no caminho, como a dureza na formação, mudança significativa no peso da broca, desbalanceamento dos parâmetros de perfuração (peso e broca) e perfuração com colunas não estabilizadas. Alguns problemas são inerentes a este tipo de poço, como por exemplo a dificuldade da instalação da coluna de revestimento, desgastes por fadiga dos tubos de perfuração e formações de chavetas, podendo causar prisão da coluna durante a retirada dos comandos.

Poços direcionais são executados quando existe a necessidade de mudança de direção ou inclinação intencional, a fim de atingir objetivos que não se localizam perpendicularmente abaixo da locação da superfície. Geralmente têm a finalidade de desviar poços que tiveram o trecho final perdido por problemas operacionais, de perfurar vários poços através de um mesmo ponto, de desviar acidentes geológicos (salinos e falhas), de atingir produções abaixo de rios, lagos e cidades e por fim de controlar o poço em *blowout* através da perfuração de poços de alívio. Podem ser classificados em:

- Tipo 1 – Caracterizado por ter o KOP(Kick-Off Point), ponto onde se inicia o ganho de inclinação à baixa profundidade, seguido do trecho SLANT, com inclinação até atingir o alvo, conforme representação na figura 2.06 abaixo:

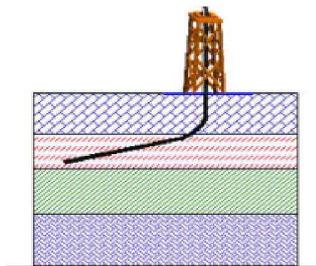


Figura 2.06 – Tipo De Poço Direcional 1
(Fonte: Biblioteca Virtual do Petróleo, 2003)

- Tipo 2 – Caracterizado por ter trecho BUILD-UP, trecho de ganho de ângulo, e DROP-OFF trecho de perda de ângulo, podendo atingir o alvo na vertical ou não, como mostra a figura 2.07 a seguir:

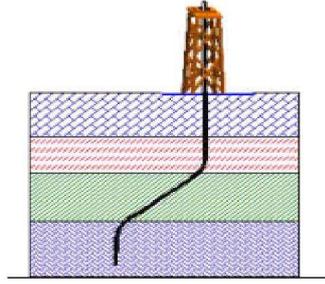


Figura 2.07 – Tipo De Poço Direcional 2
(Fonte: Biblioteca Virtual do Petróleo, 2003)

- Tipo 3 - Caracterizado por ter o KOP, ponto onde se inicia o ganho de inclinação à grande profundidade, e um trecho de ganho de ângulo até atingir o alvo. Utilizado para aproveitamento de poços já perfurados, como pode-se verificar na figura 2.08 abaixo:

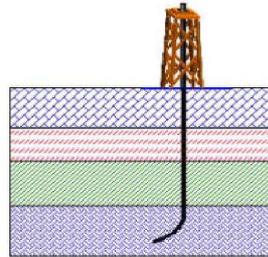


Figura 2.08 – Tipo De Poço Direcional 3
(Fonte: Biblioteca Virtual do Petróleo, 2003)

- Poços Horizontais são caracterizados por possuírem inclinação final perto de noventa graus, possibilitando maior intervalo de exposição do reservatório e aumento de produtividade, devido ao crescimento da área de drenagem no reservatório, conforme representação na figura 2.09 a seguir:

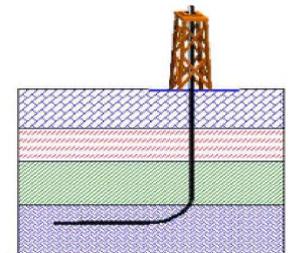
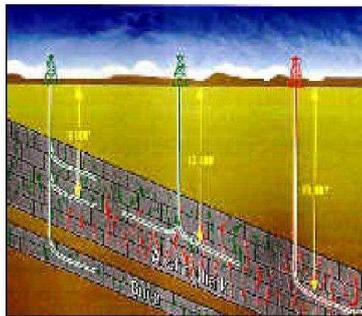


Figura 2.09 – Tipo De Poço Horizontal
(Fonte: Biblioteca Virtual do Petróleo, 2003)

Poços multi-laterais são poços especiais constituídos por duas ou mais "pernas" horizontais, com orientações distintas, construídas ao longo da rocha-reservatório com o objetivo de aumentar a extração de petróleo.

São utilizados em poços onde o petróleo está concentrado em poros com diâmetro variando de poucos milímetros a alguns centímetros. Fraturas na rocha-reservatório (rocha que contém o petróleo) também controlam a distribuição de óleo no campo.

Este processo depende da trama de fraturamento impressa nas rochas, e o condicionamento do fluxo de petróleo é por sistema de tensões. As fraturas constituem a principal rota migratória e sítio de armazenamento do óleo. Quanto mais estruturas forem interceptadas pelas pernas horizontais do poço multilateral, maior será a quantidade de petróleo produzida pelo poço, conforme representação na figura 2.10 a seguir:



*Figura 2.10 – Tipo De Poço Multi-Lateral
(Fonte: Projeto de Estruturas Marítimas USP, 2003)*

2.2 Completação

O objetivo desta seção é a explanação de alguns conceitos sobre Completação Convencional e Completação Inteligente. Serão fornecidas apenas informações relevantes para o entendimento do trabalho.

2.2.1 Definição

Após a perfuração do poço, é iniciada a completção, que diz respeito ao ato de completar o poço, ou seja, colocar a tubulação do poço (revestimento e filtro), o cascalho (pré-filtro) e o cimento (cimentação). Trata-se de conjunto de operações para equipar o poço de forma a deixá-lo em condições de produzir petróleo de forma segura e econômica, com o objetivo de minimizar a necessidade de futuras intervenções para manutenção (*workover*) e otimizar a vazão de produção (Thomas, 2000).

A etapa de projeto e planejamento da completção de um poço e sua análise econômica deve ser bastante criteriosa, pois serão atividades que terão repercussão em toda vida produtiva do poço.

A completção consiste na instalação, tanto no interior do poço quanto em sua superfície, de diversos equipamentos, componentes e subsistemas que permitem de maneira segura e controlada que o reservatório seja conectado à Unidade Estacionária de Produção (UEP). Estes equipamentos são responsáveis pelo controle da vazão dos fluidos e de funções auxiliares como elevação artificial do poço, aquisição de dados e controle da produção de areia (Thomas, 2000).

O método de completção a ser utilizado difere com relação ao tipo de reserva petrolífera a ser completada, principalmente com relação ao tipo de cabeça de poço e ao tipo de árvore de natal. Podendo ser uma completção seca ou molhada, como por exemplo:

- Em poços *onshore*, o posicionamento da cabeça de poço fica na superfície ou a poucos metros do solo (completção seca);
- Em poços *offshore*, tem-se a completção seca quando a cabeça do poço e a árvore de natal localizam-se acima da superfície do mar em uma plataforma fixa, e permitem intervenções através de sondas de superfície instaladas na própria plataforma produtora. A completção molhada é indicada para águas mais profundas, onde é inviável transportá-la até a superfície, ficando a cabeça do poço e a árvore de natal molhada (ANM) localizadas no fundo do mar. Este tipo de poço geralmente é perfurado e completado através de uma sonda-submersível, com técnicas de perfuração e completção submarina.

Existe flexibilidade em utilizar a completção molhada a partir de uma unidade desenvolvida para completção seca, mas somente com um sistema secundário, pois o primário obrigatoriamente será o de completção seca.

Quanto ao revestimento de produção, a completção pode ser a poço aberto, com *liner* canhoneado ou rasgado e com revestimento canhoneado. Quando a estrutura (formação) do poço é bem consolidada, o poço é colocado em produção com zona produtora totalmente aberta (Thomas, 2000).

Quando a perfuração atinge o início da zona produtora, é instalada a tubulação e cimentado seu espaço anular. Em seguida, continua-se a perfuração até a profundidade final, iniciando-se a produção logo após com poço aberto. Algumas das vantagens de um poço aberto é a maior vazão de fluxo e a redução de custos no revestimento, e a principal desvantagem é a seletividade, não permitindo futuras correções quando há produção de fluidos indesejáveis, como a água por exemplo.

Segundo Thomas (2000), poços com *liner* rasgado, já descido rasgado, são posicionados em frente à zona produtora, ou cimentado e posteriormente canhoneado (utilização de cargas explosivas para interligar o interior do poço à formação produtora). A vantagem do *liner* rasgado é similar ao poço aberto, acrescido da vantagem de estruturar/sustentar as paredes do poço em frente à zona produtora, mas com a desvantagem do adicional em custos. Em poços com revestimento canhoneado, são utilizadas cargas explosivas para interligar o poço ao reservatório. O poço é perfurado até a profundidade final, depois é descido o revestimento de produção, cimentado o espaço anular entre os tubos e a parede do poço, e em seguida o revestimento é canhoneado em frente às zonas produtoras.

Atualmente é o processo mais utilizado, pela seletividade da produção em diversos intervalos de interesse e maior facilidade para atividades de restauração ou estimulação. A desvantagem é o custo e o risco de danificar a formação, que poderá ser causada pela operação de cimentação.

A completção pode ser simples ou múltipla. Quando uma única tubulação ou coluna (quando a tubulação é equipada) é descida no interior do revestimento de produção da superfície até próximo a apenas uma zona produtora, produzindo e controlando de maneira independente, é chamada **completção simples**. A **completção múltipla** permite a produção de duas ou mais zonas através de uma coluna possibilitando ligações a reservatórios distintos (Thomas, 2000).

Além da vantagem do menor custo, devido a diminuição do número de poços necessários para produzir um dado campo, as completações múltiplas possibilitam a drenagem simultânea de diversas zonas produtoras, através de um mesmo poço, sem prejudicar o controle do reservatório. Também viabilizam a produção de reservatórios menores, em conjunto com a produção de zonas maiores, pois o custo de produção direcionado apenas a pequenos reservatórios os tornaria economicamente inviável. Porém, devido à complexibilidade do sistema, exige maior número de manutenções e dificulta métodos artificiais de elevação do petróleo (Thomas, 2000).

Intervenções em poços de petróleo (*workover*) são necessárias para manter a produção ou casualmente realizar melhorias na produção. No caso de pequenas manutenções, como por exemplo, abertura ou fechamento das camisas deslizantes (*sliding sleeves*), substituição de válvulas *gas lift*, registros de pressão, e outros componentes/subsistemas que possibilitem operação através de arames (*wireline*), podem ser executados sem instalação da sonda.

Geralmente utiliza-se a sonda quando se necessita corrigir falhas mecânicas na coluna de produção ou revestimento, restrições que ocasionam a redução da produtividade, produção excessiva de gás ou água e produção de areia.

Segundo Thomas (2000), as intervenções de *workover* são classificadas de acordo com a atividade a ser realizada para reabilitar o poço. A intervenção para estudo e diagnóstico das causas de um determinado problema é chamada de **avaliação**. A atividade de substituição da zona de produção ou inserção de uma nova zona é chamada **recompletação**, e é realizada quando não há mais interesse em produzir em uma determinada zona e esta é abandonada, então o poço é recompletado para produzir em outro intervalo, ou quando se deseja converter o poço produtor em injetor de água, gás, vapor, etc. **Restaurar** o poço significa colocá-lo para funcionar em condições normais de fluxo do reservatório para o poço, eliminando/corrigindo as falhas mecânicas no revestimento ou na cimentação, reduzindo a produção excessiva de gás (RGO) ou água (RAO). A interferência da água e do gás aumentam custos de produção, devido à necessidade da separação e descarte dos mesmos, sendo seu surgimento normal após determinado período de produção do poço. Falhas mecânicas e vazões restringidas também são corrigidas através da restauração. A **limpeza** é uma atividade periódica realizada no interior do revestimento de produção, cuja finalidade é a eliminação de resíduos no fundo do poço e substituição de equipamentos da subsuperfície para possibilitar um melhor rendimento. Esta atividade elimina a deposição de sólidos no

fundo do poço tamponando os canhoneados, furos na coluna de produção, vazamentos no obturador, necessidade de reposicionar componentes da coluna de produção, vazamentos em equipamentos de superfície, etc.

Geralmente poços são surgentes no início da vida produtiva. Após um determinado tempo de produção necessitam um sistema de elevação, e quando ocorrem falhas nestes sistemas é necessária substituição dos mesmos, conhecido como **mudança de método de elevação**. A **estimulação** é uma atividade que visa aumentar a produtividade ou injetividade do poço, através do fraturamento hidráulico, que consiste na aplicação de pressão transmitida pelo fluido de fraturamento contra a rocha reservatório até a sua ruptura. A fratura parte do poço e se propaga pela formação através do bombeio do fluido acima da pressão de fraturamento. O aumento da produtividade se dá devido a modificação do modelo do fluxo do reservatório para o poço. Aumenta a área do reservatório exposta ao fluxo para o poço, percorrendo caminhos com menor resistência. A acidificação, outro procedimento de estimulação, consiste em injetar ácido à uma pressão inferior à de fraturamento da formação para remover o dano de formação. Após a acidificação todo ácido deve ser removido, para não vir a formar produtos danosos à formação. Por fim, tem-se o **abandono** do poço, que pode ser definitivo ou temporário. O abandono definitivo se dá quando o poço chega ao final de sua vida produtiva ou quando é avaliado como sub-comercial ou seco após a perfuração e o temporário, quando há previsão de retorno do poço: geralmente em poços marítimos, enquanto eles são avaliados, são abandonados temporariamente até se mostrarem viáveis e assim ter início os procedimentos para instalação da plataforma de produção. Ambos são tamponados de acordo com as normas vigentes, para evitar riscos de acidentes e danos ao meio ambiente.

2.2.2 Completação Convencional

A completção convencional ou “burra” (Dev, 2001) é caracterizada por não comportar equipamentos que permitam a monitoração e controle com precisão, durante a produção de petróleo. Uma representação simples de uma Completação Convencional em um poço de petróleo pode ser visualizada na Figura 2.11 a seguir:

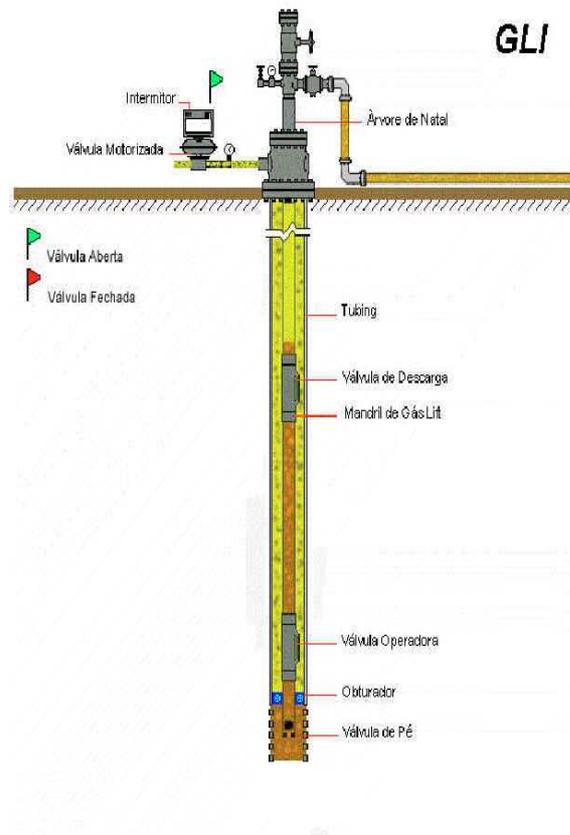


Figura 2.11 – Completção Convencional
(Fonte: IMS, 2000)

Dentre as etapas necessárias para completção, tem-se a instalação da cabeça de produção, que possibilita o acesso ao interior do poço, e a instalação do BOP (*blowout preventer*), conjunto de válvulas que permite o fechamento do poço, ambos instalados na superfície. O condicionamento do revestimento de produção é realizado através de uma coluna com broca e raspador, que deixará o interior do revestimento nas medidas necessárias para comportar os equipamentos para produção. A broca tem a função de remover tampões de cimento e tampões mecânicos que venham a existir no interior do poço e o raspador retira o que foi deixado pela broca (Thomas, 2000).

A substituição do fluido, que se encontra no interior do poço por um fluido de completção, deve ser compatível com o reservatório e com fluidos nele contidos para evitar danos à formação, originando restrições à vazão do poço. Sua densidade deve ser capaz de fornecer uma pressão hidrostática superior à estática no fundo do poço, impedindo que exista fluxo de fluidos da formação para o poço, mantendo-o amortecido (Thomas, 2000).

A função da cimentação é impedir a migração de fluidos e fornecer suporte mecânico ao revestimento. Garantindo a vedação hidráulica, possibilita-se melhor controle da origem e destino dos fluidos produzidos ou injetados. A avaliação da qualidade da cimentação é medida através da aderência do cimento ao revestimento à formação, através de perfis acústicos, tais como (Thomas, 2000):

- perfis sônicos (CBL – Controle de aderência da cimentação) e (VDL – Densidade Variável da Cimentação);
- perfis ultra-sônicos (CEL ou PEL – Controle e Avaliação de Cimentação);
- ferramenta de perfilagem ultra-sônica (USIT – a qualidade da cimentação é associada à impedância acústica do material).

A comunicação entre o interior do poço e a formação produtora é realizada através de cargas explosivas, moldadas para esta finalidade. Estas cargas são inseridas no poço em canhões, cilindros de aço com furos para alojamento das cargas, após posicionado um mecanismo para detonar as cargas.

A coluna de produção é constituída de um tubo metálico onde são conectados equipamentos para, dentre algumas funções desempenhadas, conduzir fluidos produzidos até a superfície, a proteção do revestimento contra fluidos agressivos e pressões elevadas, possibilidade de instalar equipamentos para elevação superficial e a circulação de fluidos para o amortecimento do poço, em intervenções futuras. Para pôr o poço em produção e fazer o fluido emergir até a superfície (surgência), faz-se a indução através de válvulas de *gas lift*, e por meio do flexitubo, substitui-se o fluido da coluna por outro mais leve ou por pistoneio, aliviando assim a pressão hidrostática do fluido existente na coluna de produção. Através das válvulas *gas lift*, o gás é injetado no espaço anular passando para o interior da coluna através do controle de válvulas especiais (Thomas, 2000).

No caso do flexitubo, o gás é injetado por um tubo flexível descido pelo interior da coluna de produção. O pistoneio consiste na retirada gradativa do fluido do poço por meio de um pistão. Quando estes métodos não são suficientes, utiliza-se a elevação artificial.

A seguir, alguns equipamentos instalados na coluna de produção e na superfície serão explanados (Thomas, 2000).

Em termos financeiros, o componente de maior custo na coluna são os **tubos de produção**. São especificados de acordo com o diâmetro interno do revestimento de produção, a vazão de produção, o tipo de fluido a ser produzido e os esforços mecânicos que serão suportados, como forças de tração, de colapso e pressões internas. As emendas precisam garantir a vedação e estanqueidade da coluna, realizadas através de roscas finas.

O equipamento instalado na extremidade inferior da coluna para vedação temporária da mesma é denominado *shear-out* ou sub de pressurização. Este equipamento possui três sedes: duas superiores, vedadas com o lançamento de esferas de diâmetros diferentes e a inferior tamponada, utilizada no assentamento do *packer* (obturador que promove a vedação do espaço anular entre o revestimento e a coluna de produção). O número de parafusos de cisalhamento é dimensionado conforme a pressão desprendida no assentamento do *packer*. Ao pressurizar a coluna, os parafusos cisalham e a sede é desprendida, cai no fundo do poço, e o mesmo torna-se desobstruído.

Outro equipamento que também é utilizado em tamponamentos temporários é a *hydro-trip*. A principal diferença entre a *shear-out* e a *hidro-trip* é que a última não é completamente desprendida e não cai no fundo do poço, porém não permite a passagem plena do fluxo.

Os **nipples de assentamento** são instalados na cauda da coluna de produção, por baixo de todas as outras ferramentas, servindo para alojar tampões mecânicos, válvulas de retenção ou registradores de pressão. Há dois tipos de *nipples*: o **não seletivo**, que possui um batente na parte inferior, cujo diâmetro interno é menor que o diâmetro interno da área polida. É utilizado quando a coluna suporta apenas um *niple*. E o **seletivo**, que possui batente, onde a própria área selante serve de batente localizador, podendo ser instalados vários de um mesmo tamanho em uma mesma coluna.

A **camisa deslizante**, ou *sliding sleeve*, tem a função de fazer a comunicação anular-coluna ou coluna-anular. Possui uma camisa interna que pode ser aberta ou fechada, através de operações com arame, ou *wireline*.

A **check valve** é uma válvula de retenção, cuja função é impedir o retorno do fluxo contrário ao sentido funcional do mesmo.

O **packer** de produção, ou obturador, tem a função de isolar o espaço anular entre o revestimento e a coluna de produção. São utilizados com a finalidade de proteger o revestimento (acima dele) contra pressões da formação e fluidos corrosivos, tornar capaz a injeção controlada de gás, através do anular, em casos de elevação

artificial por *gas lift*, além de permitir a produção seletiva de várias zonas por uma única coluna de produção. Os materiais que o constitui são borrachas de vedação com cunhas e pinos de cisalhamento para assentamento e desassentamento, podendo ser recuperáveis ou permanentes. Podem ser recuperáveis, reutilizados várias vezes, ou permanentes, se após o assentamento não sejam reaproveitadas.

A **unidade selante** promove a vedação na área polida do *packer*, e é situada na extremidade da coluna e travada pelo *packer*. Existem três tipos de unidades selantes: a âncora, a trava e o batente. A principal diferença entre elas é que nas duas primeiras são travadas na rosca do *packer*. A âncora não pode ser desconectada por tração, já a trava pode ser, e o batente não possui rosca que pode ser tracionada para desconectá-lo.

As contrações ou expansões sofridas pela coluna de produção, devido às variações de temperatura, são suportadas por um equipamento chamado **Junta Telescópica** (TSR - *tubing seal receptacle*), que possibilita a retirada da coluna sem a retirada do *packer* e da cauda. Compõe-se de: **a camisa**, posicionada na parte superior da coluna é composta por dois conjuntos de barreiras de detritos, quatro conjuntos de unidades selantes e a sapata guia; e **o mandril**, situado na parte inferior da coluna, é composto por um perfil F no topo, mandril polido e duas sedes para parafusos de cisalhamento.

Outro equipamento da coluna de produção é o **mandril de gas lift**, cuja função é alojar as válvulas que possibilitarão a circulação de gás entre o espaço anular e a coluna de produção. Estas válvulas destinam-se à elevação artificial de *gas lift* e são situadas na lateral do mandril, acessíveis apenas através de ferramentas especiais (desviadores), por meio de operações com arame.

O último equipamento em destaque pertencente à coluna de produção são as **válvulas de segurança de subsuperfície** (DHSV - *Down Hole Safety Valve*), posicionadas geralmente a trinta metros abaixo do fundo do mar, com a função de fechar o poço em situações de emergência. Quando instaladas no poço têm que suportar fogo e colisão para garantir a operacionalidade do sistema em caso de emergência. As enroscadas diretamente na coluna são conhecidas como *tubing mounted* e as instaladas após a descida da coluna, através de operações com arame, são denominadas *wireline retrievable*.

Os equipamentos localizados na superfície, responsáveis pela ancoragem da coluna de produção, pela vedação entre a coluna e o revestimento de produção e pelo controle do fluxo de fluidos na superfície, serão descritos a seguir.

A **cabeça de produção**, equipamento situado entre a árvore de natal e a cabeça do revestimento de produção, é um carretel entre flanges com duas saídas laterais, onde são conectadas a linha de injeção, em poços equipados com *gas lif*, e a linha de matar *kill line*, que possibilita casuais amortecimentos do poço. O suspensor da coluna de produção é apoiado na sede deste componente.

A **árvore de natal** é um conjunto de válvulas tipo gaveta que controlam o fluxo do fluido do poço através de acionamento hidráulico, pneumático ou manual. Existem dois tipos: a **ANC** - árvore de natal convencional, localizada na superfície, e a **ANM** - árvore de natal molhada, localizada no fundo do mar. A ANC é composta por duas válvulas mestras, cuja função principal é fechar o poço através de duas válvulas laterais que controlam o fluxo do poço direcionando-o para linha de surgência e uma válvula de pistoneio, instalada para permitir a descida de ferramentas na coluna de produção. Uma das válvulas mestras possui acionamento hidráulico e uma das laterais acionamento pneumático, para que em qualquer necessidade haja possibilidade de fechar o poço através de duas fontes de acionamento independentes.

A ANM difere da ANC por conter um conjunto de linhas de fluxo e um sistema de controle interligado a um painel situado na plataforma de produção. Vários tipos de ANC's serão descritas a seguir de acordo com o modo de instalação e conexão das linhas de produção e controle.

- ANM-DO (*diver operated*) são válvulas utilizadas em poços de até duzentos metros de profundidade e operadas manualmente através de mergulhadores;
- ANM-DA (*diver assisted*) são adequadas para poços de até trezentos metros, e apesar de não serem acionadas manualmente, necessitam de mergulhadores para conexão das linhas de fluxo e controle;
- ANM-DL (*diverless*), destinada a poços de até quatrocentos metros, são todas as conexões e/ou acoplamentos acionados hidráulicamente, sem necessitar mergulhadores;
- ANM-DLL (*diver lay-away*) diferenciam-se por solucionar dificuldades de conexões das linhas de fluxo e controle encontrados na DL. Estas já descem com as linhas de fluxo e controle conectadas à base adaptadora de produção (BAP) enviada antes da ANM. Outra vantagem é a interface para operações (ROV - *Remote Operated Vehicle*). O lançamento das *linhas (lay-away)* é efetuado em conjunto com a ANM, possibilitando testes em todas as interfaces antes do

lançamento, analisando e corrigindo com antecedência qualquer vazamento. A desvantagem desta ação conjunta é o retardo no cronograma de atividades, pois necessita a coordenação de programação do barco de lançamento com a sonda de completação, que geralmente apresenta atrasos decorrentes das anormalidades encontradas. A principal vantagem desta ANM é o apoio do mandril das linhas de fluxo em um berço existente na base adaptadora de produção, possibilitando que, durante intervenções, as linhas de fluxo e controle fiquem intocadas e reconectadas automaticamente, após retorno da ANM à sua posição.

- ANM-GLL (*diverless guidelineless*), usadas em poços com lâminas d'água acima de quinhentos metros de profundidade e operadas sem cabos-guia, são perfuradas por unidades de posicionamento dinâmico ou por unidades com padrão de ancoragem especial. Por este motivo todas as orientações nos acoplamentos são realizadas por grandes funis, através de sistemas de rasgos e chavetas. Neste tipo de árvore de natal, a antiga conexão *lay-away* é substituída pela conexão vertical (CV), com uso de trenó, não necessitando mais a coordenação simultânea com a descida da ANM ou da BAP. O conceito de CV foi estendido para CVD (conexão vertical direita), que ao invés de usar o trenó para abandonar o mandril das linhas de fluxo ao lado do poço, o mesmo é posicionado diretamente em seu berço localizado na BAP.

Em síntese, a completação “burra” não fornece nenhuma informação sobre o poço e não é capaz de controlar o processo sem intervenções via *wireline*, *flexitubo* ou mesmo a sonda, para aquisição de dados (medições) e alterações de fluxo das zonas de produção (Dev, 2002). É vista como um processo simples, onde todo o controle de vazão do poço é efetuado por válvulas situadas na superfície, sendo estas válvulas tipo gaveta (processo *on/off*), que não permitem controle de fluxo. A pressão é controlada por estranguladores manuais, só sendo medida e controlada a pressão de entrada do sistema de produção na superfície, não efetuando medições de pressão do poço. O óleo e o gás são produzidos até a pressão do reservatório cair, a água aumentar ou algum processo acontecer no fundo do poço que impeça a continuidade da produção (Dev, 2002).

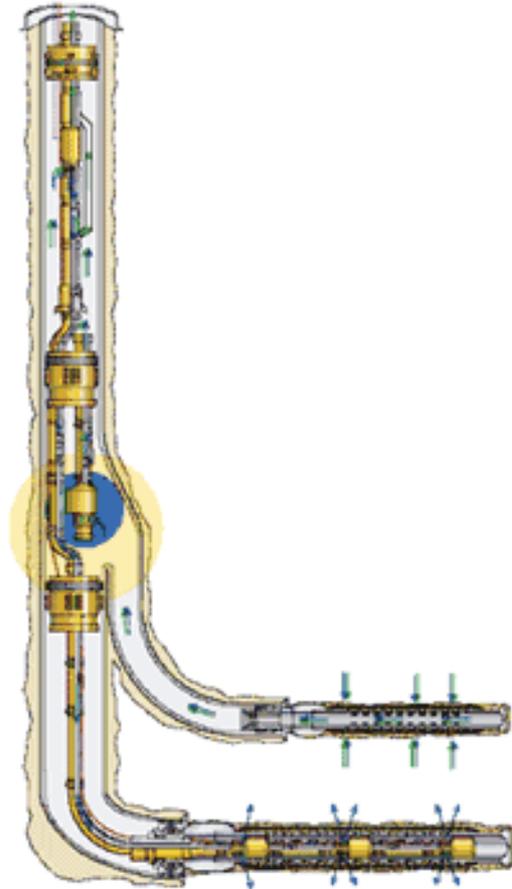
Poucos procedimentos, além da perfilagem a cabo na tubulação para verificar a pressão, a vazão do nível da areia, e a medição da pressão da superfície, são utilizados para determinar a causa da provável queda de produção.

Devido à indisponibilidade de ferramentas reais de diagnóstico e poucos meios de resolução/correção de problemas, a utilização de operações de reentrada com *slickline*, *e-line* ou *flexitubo* ou alguma operação corretiva similar, sem garantia de sucesso na operação, quando ocorrem problemas, e a primeira zona, não funcionam. Ela geralmente é abandonada e recompletada uma nova zona produtiva (Dev, 2002).

2.2.3 Completação Inteligente (CI)

Completação Inteligente (CI) é um sistema capaz de coletar, transmitir e analisar dados permitindo o acionamento remoto de dispositivos de controle de fluxo, com o objetivo de conseguir o ponto ótimo de escoamento na produção do reservatório (Borg,2001). Pode-se chamar de poço inteligente aquele que teve incorporados em sua construção os meios de controle de processo de fundo de poço (Dev, 2001). O termo CI engloba produtos e tecnologia utilizada para monitoração e controle do desempenho de reservatórios durante o ciclo de vida de um poço de petróleo, além do monitoramento e gerência dos reservatórios de petróleo em tempo real e de forma interativa (Trujillo & Maldonado, 1998).

A implantação destes sistemas possibilita precisão na aquisição de dados e parâmetros do poço, melhora a administração do fluxo e integração dos sistemas, viabiliza o controle remoto do fluxo e reduz altos custos de intervenções. O controle remoto, em conjunto com o monitoramento de várias zonas, permite executar administração contínua e em tempo real de reservatórios (Dev, 2001). A seguir, a Figura 2.12 mostra um exemplo de Completação Inteligente em poços com mais de uma zona de produção.



*Figura 2.12 – Malha Completção Inteligente
(Poço Com Mais De Uma Zona De Produção)
(Fonte: IMS, 2000)*

Estes dispositivos avançados de controle e monitoração permitem a observação da formação, capacitando o operador para prever eventuais problemas do reservatório, otimizar o desempenho do poço e maximizar a recuperação de reservas, pela possibilidade de gerenciamento de todo o reservatório e não apenas do poço, além do controle das zonas individuais sem intervenção no poço.

A CI em poços de petróleo tem como diferencial, com relação à completação convencional (Strand & Ansell & Raudand, 2000):

- a capacidade de desenvolver trabalhos em campos sensíveis, com altas pressões e baixas temperaturas, como por exemplo, o fundo do mar e produções flutuantes;
- a aceleração da produção, melhoria na obtenção de informações do reservatório ou a implementação de modificações convencionais na completação;
- a possibilidade de produzir de diferentes zonas;

- a minimização ou eliminação da necessidade de intervenções;
- a integração da gerência de reservatório e de produção como forma de otimizar a recuperação de reservatórios;
- provê dados de reservatório de qualidade para apoio de desenvolvimento de campo;
- melhora desempenho de outro equipamento de completação de poço por mais favoráveis condições de fluxo de poço por exemplo, controle de reservatório de areia, válvulas de segurança, bombas submersíveis e válvulas gás lift;
- otimiza o projeto da infra-estrutura submarina e de superfície.

A medição do fluxo do fluido no poço e da pressão e temperatura no reservatório são observadas na superfície, através de componentes eletrônicos ou fibra óticas. O controle de fluxo das zonas de produção do poço é realizado através da ação de revestimentos e válvulas de acionamento hidráulico, elétrico ou eletro-hidráulico. É uma tecnologia extremamente valiosa em poços horizontais e multilaterais, pela capacidade de controle seletivo da produção de cada zona. Outra vantagem é a alocação correta do fluxo, controlando a água e gás em todos os tipos de poços (Dev, 2001).

O sistema CI é constituído por válvulas controladas remotamente com isolamento zonal e funcionalidade monitorada, sensores de temperatura, pressão e fluxo, com finalidade de monitorar permanentemente o poço, identificar e auxiliar na resolução de problemas de produção, sistemas de fluxo seletivo, combinando poder de comando e controle, e transmissão de dados (Dev, 2001). A Figura 2.13, a seguir, representa a capacidade de monitoração de um poço e a transmissão dos dados adquiridos para um escritório central, onde geralmente são armazenados.

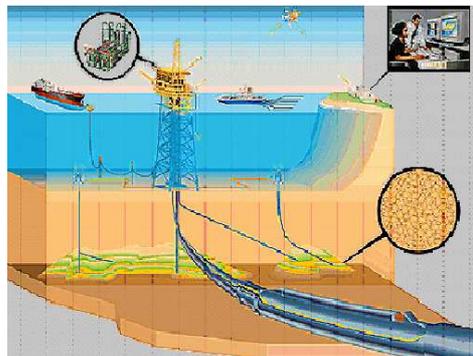


Figura 2.13 – Monitoração Completção Inteligente
(Fonte: ABB, 2000)

Os dados coletados são agrupados em um computador, armazenados em *wellsite* ou transmitidos via satélite para o escritório central. A figura 2.14, a seguir, representa a monitoração à distancia de um poço de petróleo, onde se tem a visualização e controle de todo processo de produção em tempo real:



Figura 2.14 – Monitoração Completação Inteligente
(Fonte: ABB, 2000)

Em geral, um sistema completo de monitoração e comunicação envolve diversos sensores:

- sensores com a finalidade de medir taxas de fluxo e densidade do fluido;
- sensores para monitorar bomba submersível elétrica;
- sensores para medir pressão e temperatura;
- sensores de superfície, que medem taxa de fluxo e pressão e detectam produção de areia.

Sensores com fibra ótica fazem parte de sistemas de telemetria e supervisão em controle de processos. A principal vantagem de sua utilização está no meio de transmissão utilizado, que propicia melhor condição de transmissão dos sinais de dados e controle. A fibra ótica permite implantações de sistemas globais não apenas para transmissão; sensores óticos acoplados diretamente ao meio de transmissão eliminam a necessidade dos conjuntos de sensores elétricos e outros componentes com tradutores elétricos que são vulneráveis a interferências e anomalias elétricas (Shah, 1997).

O controle de superfície é efetuado por meio de válvulas e estranguladores. Dentre os equipamentos desenvolvidos para a tecnologia inteligente, destaca-se o

sistema inteligente de controle de fluxo de acionamento elétrico ou hidráulico, constituído por um conjunto de válvulas duplas implantados em sistemas remoto que em seu próprio registrador/transmissor possibilitam leituras, na superfície em tempo real, da pressão acima e abaixo da válvula de controle de fluxo e da pressão e temperatura no espaço anular (Dev, 2001).

O sistema controlador de fluxo recuperável pela tubulação é constituído por uma válvula de controle de fluxo de variação finita regulada através de sinais elétricos transmitidos por uma unidade de controle da superfície, que por sua vez trabalha de acordo com dados enviados em tempo real por um sistema integrado de monitoração permanente da produção (*flowatcher*).

Existe também o sistema de visualização integrada de depósitos, com sensores sísmicos instalados no reservatório e contidos no sistema de monitoração e controle avançado no fundo do poço e controle de depósito, que possui válvulas de controle de fluxo em poços com sensores e um sistema de controles. Medidores de temperatura e pressão do fundo do poço são projetados para controle de produção de cada zona (completações multilaterais), controle de pressão e temperatura da coluna, zonas do reservatório e linhas de alimentação hidráulica, gerando informações precisas sobre a posição do revestimento das válvulas de controle (Dev, 2001).

O sistema de entrega/recebimento das informações faz-se através de sensores baseados na comunicação sem fio *wireless*, que consiste na implantação de geradores elétricos dentro do poço que fornecem energia para componentes eletromecânicos e eletrônicos dentro do poço. Este sistema irá fornecer subsídios para aumentar a confiabilidade da CI, aumentar a quantidade de hidrocarboneto produzido e diminuir custos de produção, sem confiar em cabos para permitir a comunicação e envio de dados (Dev, 2001).

A eficiência do monitoramento e do controle do poço depende de dados seguros adquiridos do fundo do poço, medidas que consistem em dados úteis para o diagnóstico correto e preciso a curto prazo e para planejamento de desenvolvimento a longo prazo (Eck, 1999).

Os dispositivos têm que suportar geralmente um ambiente com condições severas, e devido ao alto custo de recuperação são habitualmente substituídos. A durabilidade destes equipamentos devem atender às expectativas dos operadores, sem que ocorram falhas. Com a impraticável execução de testes de longa duração, testes de

falhas acelerados e engenharia de confiabilidade se tornaram suportes para sistemas de CI (Eck, 1999).

A inclusão de componentes redundantes reduzem as chances de, se um equipamento falhar, paralisar as operações de produção. Porém, devem-se evitar modos de falhas comuns ao especificar componentes redundantes. Indica-se que o componente *backup* seja de material diferente, ou fabricante ou mesmo lotes de fabricação diferentes, para reduzir falhas devido às mesmas condições de que originaram a falha do equipamento principal (Eck, 1999).

A **confiabilidade** é aqui analisada como a falha de um dos componentes/subsistemas no controle, na aquisição da medida ou na transmissão da mesma. Todos os fabricantes estão na busca contínua do aumento da vida útil dos seus equipamentos. A estabilidade nas medidas é importante devido à necessidade de se obter medidas concisas e precisas, para a não absorção de medidas excessivamente acumuladas, que podem ser mais problemáticas para o operador do campo de petróleo (falha na aquisição da medida) (Eck, 1999).

Adquirir confiabilidade e estabilidade requer desenvolvimento de produtos sistemáticos e testes de qualificação, uso de componentes qualificados e métodos de planos provados, auditorias rígidas e obtenção de partes genéricas, análises de falhas e consulta em produtos semelhantes industriais. Confiabilidade e estabilidade não devem ser testadas em um produto depois que é construído, pelo contrário, deve ser considerado ao longo do processo inteiro, do projeto à produção para instalação (Eck, 1999).

O estudo da confiabilidade é inserido em cada fase do processo de desenvolvimento e instalação de sistemas de monitoração. A primeira etapa consiste no desenvolvimento do perfil da missão, que define o papel de cada componente durante a expectativa de vida do poço. Os componentes são desenvolvidos para resistir às condições do ambiente o qual será instalado (Eck, 1999).

Testes acelerados realizados nos componentes simulando vibrações, temperatura, pressão e choques mecânicos que são a realidade no fundo do poço, ajudam a determinar causas de falha e modos de falha. Porém, testes a longo prazo, fornecem dados mais reais dos sistemas, habilitando engenheiros a validar modelos de confiabilidade e quantificar medidas de estabilidade (Eck, 1999).

É impossível testar tudo, mas o teste é importante para aumentar a confiabilidade do produto, provando que o produto executará a função exigida conforme informações

fornecidas em operações comerciais. O *feedback* dos engenheiros de campo é uma informação bastante importante que complementam os testes de laboratório (Eck, 1999).

Na fase de projeto do sistema, comunicação com os engenheiros de completção tem resultado na contínua melhoria nas conexões de poços e proteções do sistema. Estas informações são dados de entrada, durante a fase de desenvolvimento, e a partir do conhecimentos destas, novas simulações são realizadas para aperfeiçoamento do produto (Eck, 1999).

Ao ocorrer uma falha, engenheiros analisam as circunstâncias e às vezes tentam reproduzir o modo de falha em laboratório. Falhas mecânicas, em muitos casos, são causas oriundas de problemas de projeto, materiais defeituosos ou instalação imprópria. Um banco de dados permite análise estatística dos dados através da localização, operação, condições desenvolvidas e outros parâmetros operacionais (Eck, 1999).

A CI fornece ferramentas que melhoram a utilização do poço (recuperação global melhorada), aceleram o aumento da produção, reduzem riscos, frequências de intervenções, instalações superficiais e são sistemas com maior funcionalidade.

Os objetivos dos novos sistemas de CI são de assegurar a satisfatória confiabilidade do sistema e desempenho operacional a longo prazo. Como qualquer tecnologia nova, a CI enfrenta obstáculos para ganhar aceitação das indústrias. Apesar dos fabricantes estarem aprimorando os sistemas de CI, e o melhoramento à confiabilidade dos mesmos, as empresas de exploração e produção de petróleo (operadores) ainda estão relutantes em adotar esta nova tecnologia, mesmo com benefícios potenciais relatados. Operadores se preocupam com o alto investimento inicial e a baixa confiabilidade que foram informadas das primeiras instalações (Dev, 2001). Diversos estudos estão direcionados para melhorar a confiabilidade destes sistemas. Simulações com relação à confiabilidade dos mesmos estão sendo utilizadas como ferramentas de apoio à decisão durante o desenvolvimento do projeto.

Estas vantagens da CI são só o começo do que será incorporado em uma completção verdadeiramente inteligente. No futuro, haverá uma variedade de novos conhecimentos, incluindo acompanhamento das mudanças dinâmicas das propriedades dos reservatórios, detectando espécies químicas, medidas de fluxo satisfórias, controle de campo em tempo real e otimização do sistema, amarrando poços inteligentes a sistemas especialistas e simulações de reservatórios (Dev, 2001).

Uma visão a longo prazo para CI é um sistema integrado de produção, onde vários poços automatizados de forma individual são integrados em todo o campo,

através de um grande processo de gerenciamento de produção e reservatório. Isto significa controle entre o sistema de monitoração e os equipamentos de controle de fluxo através da realimentação obtida pela comparação da performance do reservatório, obtida a partir dos resultados da monitoração e das simulações. Atualmente, para alcançar esta configuração mais completa os desafios são (Silva Jr., 2003):

- otimização individual da produção do poço;
- otimização do reservatório através de resultados de simulações dinâmicas, histórico de produção, dados provenientes dos sensores da CI e pela atuação remota seletiva, levando em consideração as diferenças entre reservatórios e as limitações do sistema de produção;
- otimização da produção do campo, não apenas do poço, tendo condições de contorno à infra-estrutura de produção existente.

Espera-se que os sensores sejam capazes de fazer medidas precisas permitindo a caracterização detalhada do reservatório e cuja resposta diminua consideravelmente a incerteza do modelo e a dependência da simulação para efeito de controle (Silva Jr., 2003).

O avanço desta tecnologia permitirá que o controle de produção diário de todo um poço seja feito em função da demanda de produção e da cotação do petróleo bruto (Silva Jr., 2003), onde o reservatório, o campo e o poço estarão automatizados, como apresentado na Figura 2.15 a seguir. O resultado é diminuição considerável da incerteza do modelo e a dependência da simulação para efeitos de controle, possibilitando a malha fechada de controle.

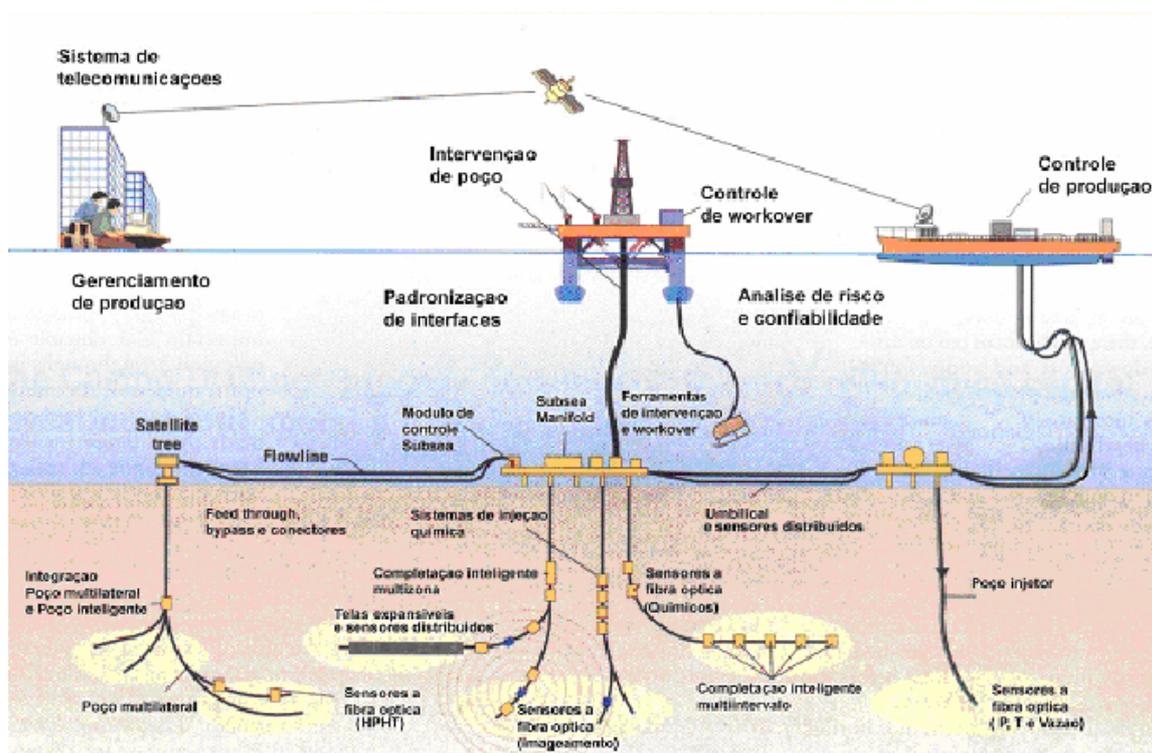


Figura 2.15 – O Futuro da Completção Inteligente
(Fonte: ABB, 2000)

A seguir no próximo capítulo será apresentada a Metodologia aplicada, uma explanação dos conceitos e definições necessárias sobre Confiabilidade, confiabilidade em malhas de CI, Disponibilidade de Sistemas e a apresentação do Processo de Markov e da Metodologia Bayesiana.

3 METODOLOGIA APLICADA

Este capítulo tem a finalidade de explanar sobre a Metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a modelagem e simulação da malha de CI.

Apresentam-se a seguir os conceitos e informações relevantes sobre Confiabilidade, Disponibilidade, Modelos Markovianos e Métodos Bayesianos.

3.1 Confiabilidade de sistemas

O objetivo desta seção é a explanação de alguns conceitos de confiabilidade e disponibilidade de sistemas para proporcionar uma visão geral na modelagem e avaliação da confiabilidade do sistema em estudo.

3.1.1 Análise da confiabilidade de sistemas

Um sistema perfeito seria constituído de componentes e dispositivos, que durante um período pré-determinado de tempo desenvolvessem a atividade para a qual foram projetados, sem a ocorrência de falhas. Porém, projetistas não têm conhecimento total das condições de trabalho, de manutenção e produção de tais componentes e dispositivos, não sendo estes apenas os fatores limitantes, pois os custos de desenvolvimento, materiais, testes, entre outras etapas de projeto e produção de um sistema, encarecem demasiadamente o projeto, tornando economicamente inviável a construção de um sistema mais perfeito. Portanto, devido às limitações práticas e econômicas, sistemas, componentes e dispositivos não são perfeitos, sendo passíveis de falhas durante o tempo de vida.

As falhas são resultados da existência de desafios impostos sobre o sistema, determinadas condições internas que geram divergências na operação normal do sistema, como também a existência de condições externas, resultantes do trabalho desenvolvido em um determinado cenário. Tais obstáculos podem ser causados por agentes como o *stress* e o tempo. Cada sistema tem uma capacidade inerente de resistir

a determinados desafios, e esta capacidade pode ser reduzida através de condições internas ou externas específicas, e quando estes ultrapassam a capacidade do sistema, a falha ocorre.

Um dos objetivos da engenharia de confiabilidade é a prevenção de falhas, através de análises detalhadas para aquisição de dados de como e por que estes agentes conduzem às falhas. Estatisticamente, o conceito de confiabilidade segue alguns fatores como a quantificação em termos de probabilidade, a definição do cenário específico em que funcionará o sistema, a determinação do tempo de operação do sistema até a primeira falha e entre falhas, e a definição do ambiente em que o sistema foi projetado para funcionar, isto é, observações quanto a características inerentes ao meio, tais como, temperatura, pressão, umidade, vibração, impurezas, entre outras.

De uma forma geral, pode-se dizer que a confiabilidade de um sistema está relacionada com algumas características como a durabilidade, disponibilidade para operação imediata, não ocorrência de falhas, adquirindo um certo grau de confiança ao produto/sistema. É amplamente aplicada como informação fundamental de apoio à decisão no melhoramento do produto durante o desenvolvimento do projeto, na definição da margem de segurança inserida ao produto e na determinação de sua garantia de fábrica.

Alguns benefícios da aplicação de estudos de confiabilidade (Lafraia, 2001):

- redução de custos de manutenção (paradas não programadas), perda lucro pela parada de produção e menores possibilidades de acidentes;
- fornecimento de soluções às necessidades das indústrias como: aumentar a produção de produtos, obter maior flexibilidade para utilização de diversos tipos de carga, responder com maior rapidez às mudanças nas especificações dos produtos, cumprir a legislação ambiental e de segurança e higiene;
- viabilização de investimentos com base em informações quantitativas, segurança, continuidade operacional, meio ambiente;
- eliminação de causas básicas de paradas não programadas dos sistemas, diminuindo tempos de paradas programadas e através do aumento da mantabilidade das instalações;

- atuação nas causas dos problemas e não nos sintomas, analisando: histórico de falhas e causas das falhas para prevenção de falha em equipamentos similares e determinação de fatores críticos para a manutenibilidade de equipamentos.

3.1.2 Definição

Uma definição amplamente aceita de confiabilidade é a habilidade de um item (produto, sistema, etc.) operar com sucesso sob determinadas condições por um período designado de tempo ou número de ciclos (Modarres, 1999).

Os estudos desenvolvidos para a compreensão de como e por que um item falha, e como pode ser projetado e testado para prevenir tais falhas de ocorrência e recorrência, são os principais aspectos da análise de confiabilidade.

Quantitativamente, a confiabilidade de um item é analisada através de métodos probabilísticos que a tratam como a probabilidade de realizar uma função planejada com sucesso em um determinado período de tempo, quando o sistema é operado/usado de acordo com as condições pré-determinadas.

Então, dada a variável aleatória contínua T , denominada tempo de falha de um componente/subsistema, sendo $T \geq 0$, a probabilidade de falha em função do tempo $\Pr(t)$ é determinada como:

$$\Pr(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt = F(t)$$

Sendo $F(t)$ a Função de Distribuição Acumulada (FDC), há probabilidade do item falhar em t ou antes de t ;

A função confiabilidade $R(t)$ pode ser definida como o complemento da probabilidade de falha:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$R(t)$ de satisfazer as seguintes condições:

- $R(0) = 1$

- $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$
- $R(t) \geq 0$, a função confiabilidade é monotônica decrescente para todo t .

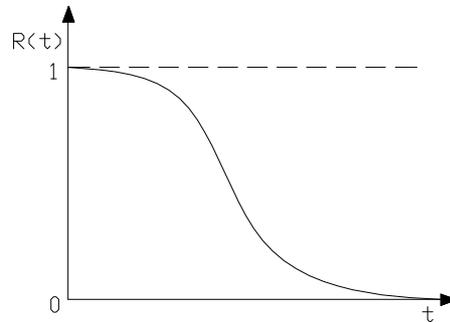


Figura 3.01 – Função Confiabilidade
(Fonte: Droguett, 2000)

Uma das aplicações da função confiabilidade é a comparação do comportamento de dois sistemas ou componentes em um determinado período de tempo.

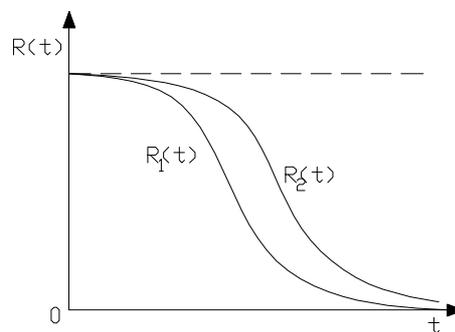


Figura 3.02 – Comparação Entre Configurações Distintas Função Confiabilidade
(Fonte: Droguett, 2000)

A Função de Densidade de Probabilidade (FDP) da variável aleatória T representa a forma da distribuição do tempo de falha:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

$f(t)$ possui as seguintes condições:

- $f(t) \geq 0$
- $\int_0^{\infty} f(t)dt = 1$, para todo $t \geq 0$

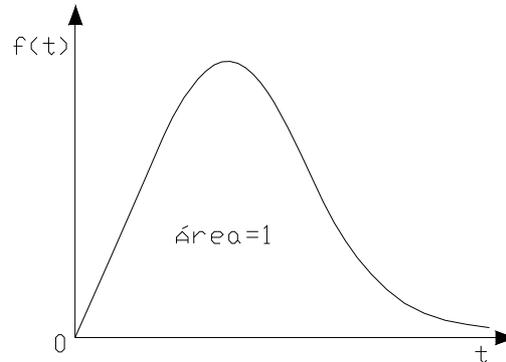


Figura 3.03 – Função Densidade Probabilidade (FDP)
(Fonte: Droguett, 2000)

Integrando-se a função densidade de probabilidade, podem-se encontrar a função confiabilidade $R(t)$ e a função de distribuição acumulada $F(t)$.

- FDC:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad \therefore \quad dF(t) = f(t)dt$$

$$\int_{F(0)}^{F(t)} dF(t) = \int_0^t f(\tau)d\tau \quad \therefore \quad F(t) = \int_0^t f(\tau)d\tau$$

- $R(t)$:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad \therefore \quad dR(t) = -f(t)dt$$

$$\int_{R(0)}^{R(t)} dR(t) = -\int_0^t f(v)dv \quad \therefore \quad -\int_{R(t)}^{R(\infty)} dR(t) = \int_t^{\infty} f(v)dv$$

$$\therefore \quad R(t) = \int_t^{\infty} f(v)dv$$

Algumas outras definições importantes são:

- Tempo Médio de Falha (MTTF- *Mean Time To Failure*) – trata-se do tempo médio ou valor esperado da distribuição de probabilidade do tempo de falha T .

Elucida o tempo esperado em que o item desenvolverá a função a qual lhe foi designada com sucesso, isto é, sem a ocorrência de falhas. É definido por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

que pode ser reescrito como:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

- ii. Taxa de falha – é a probabilidade da falha por unidade de tempo de um item, dado que o mesmo está em operação até o instante t:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

A forma da distribuição da taxa de falha mostra as fases de vida de um item, isto é, apresenta as mudanças na probabilidade condicional da falha ao longo da operação. A **fase decrescente** possui uma menor probabilidade de falha. É geralmente observada no início da operação quando um componente/subsistema inicia sua atividade. Na **fase constante**, a taxa de falha é aproximadamente estável durante um determinado período de tempo; **fase crescente**, o componente está sujeito a processos de desgaste, consequentemente haverá uma maior probabilidade de falha. O formato da distribuição é conhecido como a curva da banheira:

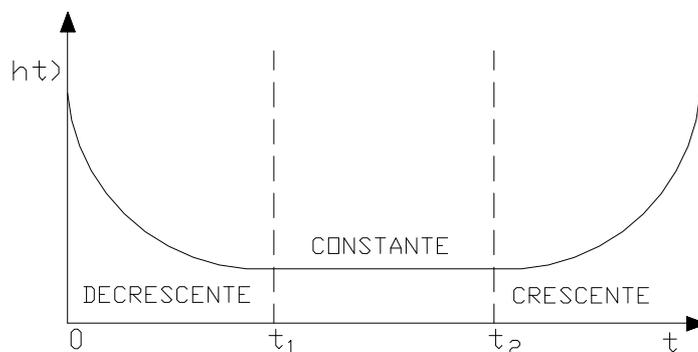


Figura 3.04 – Curva da Banheira
(Fonte: Droggett, 2000)

3.1.3 Análise de sistemas

Entende-se que um sistema seja uma coleção de itens (subsistemas, componentes, softwares, operações humanas), que interconectados permitem a sua funcionalidade. Dentro do contexto de confiabilidade e manutenção podem ser classificados como sistemas reparáveis ou não-reparáveis. Nos sistemas não-reparáveis, aqueles que são descartados ou substituídos após a falha, apenas o tempo de operação até a primeira falha é de interesse. Nos reparáveis após ocorrer a falha, passam por um processo de reparo ou manutenção, para posteriormente voltar à operação e o tempo em que o sistema está em operação ou disponível é o fator de interesse. Na análise da malha de CI, considerou-se que o sistema é reparável, sendo a completa substituição de um sub-sistema ou componente considerada como reparo.

A análise da confiabilidade de sistemas é importante para modelar a relação entre seus vários itens, bem como a avaliação individual de cada item, obtendo conhecimento da maneira que um determinado item pode falhar.

Dentre os vários esquemas de modelagem de sistemas, o diagrama de blocos de confiabilidade destaca-se como uma técnica utilizada para prover um modo útil de administrar e interpretar a estrutura de um sistema, permitindo que estes sejam divididos em blocos de fácil manipulação, mantendo a integridade da sua estrutura. São utilizados para modelagem do efeito de itens falhos no desempenho do sistema. São geralmente representações gráficas do arranjo físico do sistema. Cada bloco representa trechos do sistema, para os quais dados de confiabilidade estão disponíveis.

A malha de CI será caracterizada em termos dos subsistemas considerados na sua configuração. A disposição dos equipamentos numa determinada configuração, a quantidade de zonas de produção, se as mesmas são em série ou em paralelo, os tipos de componentes/subsistemas, quais equipamentos têm interdependência com outros na malha, são informações apresentadas através deste diagrama.

Exemplos serão apresentados na descrição do cenário em estudo da malha de CI no Capítulo 04.

3.1.4 Confiabilidade de Malhas CI

Nesta seção serão apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a confiabilidade de malhas de completção inteligente em poços de petróleo. Apesar de se tratar de uma nova tecnologia, tendo inclusive alguns de seus sub-sistemas em desenvolvimento.

Alguns estudos foram desenvolvidos nesta área. Um deles é o trabalho de Borg (2000), que durante a comparação da relação custo/benefício de completções convencionais e inteligente, analisou um dos maiores problemas da CI: a confiabilidade do sistema.

O trabalho consiste em estudar as falhas potenciais que podem ocorrer em poços inteligentes. Para análise da confiabilidade foram utilizadas as seguintes técnicas com objetivo de identificar a frequência e consequência das falhas:

- identificação das falhas em potencial pelo método HAZID (Rausand,2000);
- utilização do procedimento HAZOP (Rausand,2000);
- emprego da análise de modos de falha, efeito e análise crítica (FMECA) (Modarres,1999).

O método HAZID foi implementado através de uma seção *brainstorming* e aplicado a estes resultados utilizadas as técnicas do método. O HAZOP é similar ao HAZID, porém é utilizado para processos contínuos. O FMECA foi usado como uma técnica para análise de falhas sistemáticas, onde o objetivo foi identificar todos os possíveis modos de falha, causas e efeitos de cada falha.

Após esta primeira etapa, foram calculadas as probabilidades de falha com o auxílio do *software* CARA (Technische,2001), e a análise de confiabilidade foi executada considerando a utilização da distribuição Weibull, para estimar taxas de falhas no tempo, que forneceu uma aproximação mais correta que outras distribuições como a distribuição de exponencial.

Porém a modelagem realizada neste estudo não tratou a complexidade inerente ao sistema de ser dinâmico. Um outro problema encontrado, e considerando o mais relevante por partes dos autores, foi a quase inexistência de dados relevantes. Os dados foram obtidos de conhecimentos de especialista e dados providos do *SINTEF Petroleum Reserarch* (Jenssen, 1999) e foram fornecidos a um simulador para aquisição das

probabilidades de falha dos componentes e subsistemas da malha. Não foram realizadas demonstrações mais completas só a probabilidade da ocorrência de falhas foi calculada.

Outro estudo desenvolvido por Mathieson (2003) apresenta um processo de modelagem utilizando três modelos para análise da confiabilidade. Uma das primeiras atividades é a definição do perfil da missão. São incluídos aspectos como funcionalidade, expectativa de vida e o ambiente de operação no qual se constituirá a falha. Em seguida são construídos os diagramas de blocos do sistema, para melhor interpretação da arquitetura da malha, onde são utilizadas ferramentas como Modos de Falhas e Efeitos de Análise(FMEA), Testes de Modos de Falha (FMT) e Quantitativos de Vida/Stress Testes Acelerados (QALT, QAST), no planejamento e análise conjunta com o diagrama de blocos.

Concluída esta fase, são apresentados os três modelos para análise da confiabilidade do sistema:

- análises não-paramétricas
- análises Confiabilidade Exponencial
- análises Confiabilidade Weibull

O método não-paramétrico foi descrito por van Gisbergen (1999) ao analisar a confiabilidade de dados de campo. Este método é baseado em técnicas de Kaplan & Meier (1998) e assume a validade de estatística de ordem onde todo o sistema segue dados de instalação. A probabilidade que um sistema sobreviverá t meses S(t), é dado por:

$$S(t) = \prod_x^t \left[1 - \left[\frac{d_x}{(n_x - w_x/2)} \right] \right]$$

onde W_x representa o número comum de sistemas censurados ou suspensos no mês x e n é o número de sistema completamente operacional por aquele mês.

Os resultados obtidos com este método são apenas baseados em registros de rasto do sistema instalado, isto é, dados reais, não foi projetado para outros tipos de dados.

O modelo exponencial para confiabilidade é mais aplicável ao sistema no período de vida útil onde falhas precoces do protótipo e fim de vida não são pontos de

suma importância. Este modelo descreve taxas de falhas constantes e é associada à parte aproximadamente constante da curva da banheira. Enquanto o modelo Weibull é um método mais abrangente para determinar métricas de confiabilidade, porém ambos trabalham com taxas constantes e são modelos utilizados para análise da confiabilidade de sistemas possuem apenas dois estados possíveis operacional ou falho.

Veneruso (2003), enfatiza o potencial futuro da CI em termos de custo e risco através da confiabilidade aplicada à malha e desenvolveu um processo similar ao Mathieson (2003). A metodologia consiste na utilização de análise de sobrevivência para avaliação de sistemas de monitoração e controle, com o objetivo de mensurar a confiabilidade de registros de equipamentos herdados de campos. A utilização da modelagem Weibull, para modelar e parametrizar estimativas. A utilização de FMEA para identificar, classificar e documentar modos de falhas e estabelecer base para ações corretivas.

Contudo, Droguett (2002) apresenta um modelo para avaliação da confiabilidade de malhas de completação inteligente através de modelos de Markov, o qual tomamos como base para esta pesquisa.

No modelo analisado por Droguett (2002), foram apresentadas quatro diferentes malhas onde realizou-se um estudo comparativo entre as quatro configurações para avaliar a probabilidade de ocorrência da primeira falha crítica do sistema.

As taxas de falhas dos subsistemas/componentes foram baseadas no conhecimento dos técnicos da Petrobras e trabalhadas com a hipótese de taxas constantes, isto é, desconsiderando a degradação do sistema.

Foram comparados os seguintes itens das quatro configurações:

- subsistemas que podem fazer parte de uma determinada malha;
- se a falha de um subsistema/componente implica na falha da malha;
- quando um determinado subsistema/componente está ou não presente na malha;
- natureza dos subsistemas de atuação e monitoração das malhas.

Foram expostas à caracterização e modelagem das malhas em seus subsistemas, construídos os diagramas de bloco e representados graficamente através do diagrama de Markov. Após concluída a elaboração da matriz de transição, calculou-se a

probabilidade do sistema ocupar cada um dos estados. De posse destes dados, as seguintes métricas de confiabilidade foram estimadas:

- tempo falho total médio (TFT) e o tempo de operação total médio (TOT);
- taxas de falha do sistema;
- a confiabilidade do sistema e a confiabilidade média;
- as probabilidades de falha do sistema ao final da missão (cinco anos) e a probabilidade de falha média.

Com base nestes estudos surgiu a necessidade de quantificar a incerteza inerente aos dados disponíveis, taxas de transição, inseridas no modelo Markoviano, pois apenas estimativas destas taxas, fornecidas por especialistas, foram utilizadas.

3.2 Análise de falhas em sistemas

3.2.1 Falhas Dependentes

Em geral, falhas dependentes são definidas como eventos nos quais a probabilidade de cada falha é dependente da ocorrência de outra falha (Modarres, 1999). São de grande importância em análises de confiabilidade e devem ser tratadas adequadamente para minimizar estimativas otimistas.

Geralmente, falhas dependentes são causadas por condições internas desses sistemas ou devido ao ambiente externo em que se encontram. São falhas que geralmente ultrapassam a capacidade inerente aos sistemas redundantes. Ocorrem através de uma falha que por sua vez acarreta falha simultânea em dois ou mais componentes de um sistema redundante.

Dentre os aspectos internos, as falhas decorrentes de dependência entre sistemas e dependência entre componentes de um mesmo sistema, podem ser categorizadas por **dependência funcional**, **dependência física** ou causada por **intervenção humana**. Os aspectos externos são relacionados a eventos ambientais, tais como, terremotos, enchentes, ambientes com excesso de calor ou umidade ou ainda ações humanas, por exemplo uma mesma equipe de manutenção.

As falhas dependentes podem ser classificadas como:

- Dependência positiva - quando um componente falha, aumenta a possibilidade de falha do(s) outro(s) componente(s), podendo ocasionar falhas em cascata, onde, a partir da primeira falha, múltiplas falhas ocorrerão;
- Dependência negativa - redução da tendência de falha dos outros componentes, caso um componente vier a falhar;
- Falhas de causa comum - falhas múltiplas cuja causa provém da mesma natureza ou raízes em comum (compartilhada);

3.2.2 Falhas de Causa Comum

São falhas múltiplas e resultantes diretas de uma causa raiz em comum. Esta causa raiz pode devido às condições ambientais extremas, como por exemplo, enchentes, abalos sísmicos, incêndios, etc. A falha humana também pode ser diagnosticada como um tipo de causa raiz, por exemplo: erros de manutenção ou operação, ou mesmo a falha de um equipamento externo ao sistema que mantenha relações de dependência (Droguett, 2002). Podem ser definidas como subconjuntos de falhas dependentes em que dois ou mais estados falhos de componentes existam ao mesmo tempo, ou em um curto intervalo de tempo, e são o resultado direto de uma causa em comum (compartilhada) (Mosleh, 1988).

A modelagem de falhas de causa comum pode ser realizada através de modelos paramétricos simples ou múltiplos. O mais usado é o modelo do fator Beta definido (Fleming, 1975):

$$\beta = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_I} = \frac{\lambda_c}{\lambda_I}$$

onde λ_c é a taxa de falha devido a causa comum, λ_I é a taxa de falha analisando o componente independente. Será o modelo utilizado neste estudo, devido a menores exigências e à facilidade de aplicação.

Os modelos paramétricos múltiplos, modelo do fator Alpha (Mosleh & Siu, 1987) e o modelo de Múltiplas Letras Gregas (Fleming, 1975) são utilizados quando se

necessita uma análise mais criteriosa de probabilidade de falha de causa comum, onde se constituem sistemas com maior grau de redundância. São modelos que necessitam uma maior quantidade de dados disponíveis para análise.

3.3 Disponibilidade de Sistemas

A análise de disponibilidade é realizada para verificar se em um determinado período de tempo o sistema estará operacional para alcançar o objetivo a que foi planejado. Enquanto a confiabilidade é o estudo direcionado até a primeira falha do sistema, a disponibilidade está relacionada com as fases em que o sistema está disponível para operação.

Em sistemas não reparáveis, onde o objetivo da análise de confiabilidade vai até a primeira falha do sistema, o conceito confiabilidade pode ser também expressado por disponibilidade instantânea. Em sistemas não reparáveis, não é considerada a possibilidade de reparo. São geralmente sistemas descartáveis e passíveis de substituição, como por exemplo, lâmpadas, transistores, pentes de memória RAM, etc.

Estudos da disponibilidade de sistemas são direcionados ao tratamento de sistema reparáveis, isto é, itens que após falhar são reparados e colocados em operação novamente dentro do tempo de missão considerado.

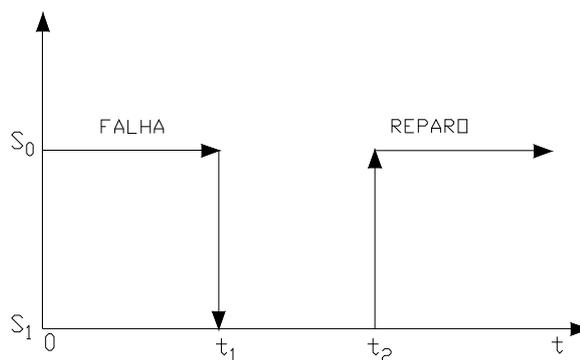


Figura 3.05 – Gráfico Análise de Falha de um Sistema
(Fonte: Droguett, 2000)

O gráfico acima demonstra a análise de um determinado componente, onde a confiabilidade do sistema só é calculada até o momento t_1 , onde ocorreu a primeira falha do sistema. No período $U(t)$ o sistema encontra-se indisponível (podendo estar em manutenção). Na análise da disponibilidade o importante é o período de tempo que o sistema se encontra operacional. Portanto após sofrer reparo o sistema volta a ser observado, contando-se apenas os períodos em que o mesmo encontra-se disponível. Se o importante fosse a análise só até a primeira falha do sistema, os conceitos de confiabilidade e disponibilidade teriam o mesmo objetivo.

Neste trabalho, considera-se que os componentes da malha de CI, após a falha, serão reparados e voltarão à operação, sendo o reparo considerado como a completa substituição de um componente da malha.

A seguir apresenta-se alguns conceitos importantes com relação a disponibilidade.

3.3.1 Definição

Disponibilidade é a probabilidade de um sistema ou componente, quando em operação nas condições definidas em projeto, estar operacional em um determinado momento (Modarres,1999). Disponibilidade instantânea $D(t)$ é a probabilidade de que um sistema esteja em condição operacional no instante t :

$$D(t) = Pr(t)$$

A Indisponibilidade Instantânea do sistema $I(t)$ é a probabilidade de que um sistema esteja em condição indisponível ou não operacional no instante t . É calculada como 1 menos a disponibilidade instantânea do sistema:

$$I(t) = 1 - D(t)$$

A disponibilidade média (\bar{D}) é a disponibilidade em um intervalo de tempo t , e é definida como a fração do tempo em que o sistema espera estar em qualquer instante t . É obtida como o tempo esperado que o sistema passa em t dividido pelo intervalo:

$$\bar{D} = \frac{1}{t} \int_0^t \Pr(\tau) d\tau$$

Após alguns efeitos transitórios iniciais e baseada em um tempo de missão extenso ($t \rightarrow \infty$), a disponibilidade pode assumir um valor independente do tempo. Ao se atingir um estado estacionário ou assintótico, a disponibilidade pode ser obtida a partir das probabilidades estacionárias:

$$D(t) = \bar{D}(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \Pr(\tau) d\tau$$

A próxima seção apresenta, de uma maneira mais detalha, a disponibilidade de sistemas aplicando uma ferramenta adequada para avaliação e modelagem destes sistemas, o Método Markoviano.

3.4 Modelagem via Processos de Markov

O objetivo desta seção é realizar uma explanação acerca de Processos Markovianos, os conceitos envolvidos no modelo e outras definições necessárias para aplicação do método, com a finalidade de obter atributos de confiabilidade. As taxas de transição, que são dados de entrada do Processo Markoviano, serão obtidas através de opiniões de especialistas e dados genéricos de bancos de dados (OREDA, 2002), tratados através da metodologia Bayesiana.

3.4.1 Processos estocásticos

Processo estocástico, ou processo aleatório como também é conhecido, é uma família de variáveis aleatórias definidas num mesmo espaço de probabilidade. Geralmente é representado por $\{X(t):t \in T\}$. Em termos de confiabilidade, t é a representação do tempo e $X(t)$ é o estado do processo no instante t . T é denominado conjunto de índices ou espaço paramétrico do processo estocástico.

Chama-se processo estocástico contínuo ou de parâmetro contínuo se T é um intervalo, finito ou não de números reais. Se o conjunto de índices T é contável, então denomina-se o processo estocástico discreto ou de parâmetro discreto.

O espaço de estados de um processo estocástico é o conjunto de todos os valores possíveis que uma variável aleatória $X(t)$ pode assumir. Este espaço de estados pode ser discreto ou contínuo de acordo com a variável aleatória $X(t)$.

3.4.2 O Modelo de Markov

Análise Markoviana constitui-se em uma poderosa e flexível técnica de modelagem e análise amplamente empregada em análises dinâmicas de confiabilidade e disponibilidade de sistemas (Droguett, 2002).

É um dos mais importantes processos estocásticos, com várias aplicações em confiabilidade. É uma ferramenta bastante utilizada para avaliação da disponibilidade de sistemas de múltiplos estados, e pode ser utilizada em situações onde o emprego de modelos paramétricos simples de tempo de falha, como as distribuições exponencial e weibull, não sejam suficientes para descrever as características dinâmicas da confiabilidade e disponibilidade de um sistema.

Os sistemas estudados neste trabalho estão em constante evolução ao longo do tempo e sofrem alterações devido a fatores externos e internos. A Cadeia de Markov evidencia conceitos e propriedades que melhor se ajustam no tratamento destes modelos dinâmicos. Os atributos fornecidos por este modelo tem base no comportamento e evolução do sistema, e fornecem uma funcional ferramenta de decisão que permite, por exemplo, dentre várias possibilidades, escolher qual a mais vantajosa ou que decisão tomar num determinado momento.

O objetivo do Modelo Markoviano é determinar a probabilidade de que o sistema estará em um determinado estado em função do tempo (Droguett, 2002). Neste trabalho, será utilizado para obtenção de atributos de confiabilidade e disponibilidade do sistema, como por exemplo: a probabilidade do sistema estar em um dado estado, em um determinado instante, a quantidade média de tempo que o sistema passa em cada estado, o número esperado de transições entre estados, entre outros atributos que por ventura se fizerem necessários para se chegar ao objetivo específico deste estudo.

A cadeia de Markov é um tipo particular de processo estocástico, que pode ser compreendido como uma série de transições de estados do processo, onde dado um estado ($t=t_2$), pode ser deduzido a partir do conhecimento do estado num momento anterior a este ($t=t_1$), não dependendo do histórico do sistema antes do momento ($t=t_1$). Quando o estado atual é conhecido, a probabilidade de qualquer comportamento futuro do processo não é alterada por conhecimento adicional, no que diz respeito ao seu comportamento passado. Em outras palavras, pode-se dizer que: dado o estado presente do processo, o estado futuro é independente do passado. Por esta razão, é geralmente denominado processo sem memória.

O processo de Markov pode ser classificado pelo espaço dos estados, ou seja, pelo conjunto dos possíveis valores do Processo Estocástico, podendo este ser um Processo Estocástico de Parâmetro Discreto $\{X_t, t = 0, 1, 2, \dots\}$ ou Parâmetro Contínuo $\{X_t, t \geq 0\}$, para todo n instantes $t_1 < t_2 \dots < t_n$ do conjunto T do processo.

$$P(X_{t_0} \leq X_n / X_{t_1} = X_1, \dots, X_{t_0-1} = X_{n-1}) = P(X_{t_0} \leq X_n / X_{t_0-1} = X_{n-1})$$

Onde a distribuição condicional de X_{t_0} depende apenas do valor mais recente X_{t_0-1} , ou mais precisamente de valores reais X_1, \dots, X_n .

Denomina-se Cadeia de Markov os processos estocásticos de tempo discreto, e são geralmente representadas pelo espaço dos estados do conjunto que pode ser finito ou infinito numerável. Estes estados podem representar situações em que o sistema está falho (indisponível), está em operação nas condições normais (disponível), em operação mas não em suas perfeitas condições de trabalho (degradado), em *stand by* ou em manutenção/reparo.

A classificação dos estados da cadeia de Markov e as propriedades para classificação dos estados de uma cadeia de Markov (Bernardo,1999) serão dadas a seguir:

- $j \rightarrow i$: o estado j é acessível a partir do estado i , para todo $n \geq 0$, $P_{j,i}(n) > 0$.
No caso de só existir uma classe de comunicação, diz-se que o sistema é irreduzível;
- $j \leftrightarrow i$: j é acessível a partir de i e i é acessível a partir de j (simetria), então $i \leftrightarrow j$;
- $j \leftrightarrow j$: todos os estados também se comunicam com eles próprios (reflexibilidade), $P_{jj}(0) = P(X_0 = j / X_0 = j) = 1$;
- $j \leftrightarrow i$ e $i \leftrightarrow k$, então $j \leftrightarrow k$ (transitividade);
- Diz-se que um estado é:
 - recorrente, quando $f_{jj} = 1$, probabilidade do processo voltar ao estado j , sabendo que este partiu do estado j ;
 - transiente, se $f_{jj} < 1$, um estado da classe dá acesso a um estado de outra classe;
 - absorvente, se $p_{jj} = 1$;

Diagrama de transições

Consiste na representação de todas as seqüências de estados e suas propriedades temporais, isto é, dado um conjunto de estados discretos em que o sistema pode se encontrar em um determinado instante, para cada transição, é definido um $\lambda_{i \rightarrow j}$, onde i e j designam respectivamente o estado de origem e o estado destino das transições.

Esta transição entre estados ocorre devido a eventos como falha, intervenções de inspeção, manutenções preventivas ou corretivas, operações de controle, como é o caso do (*switching*).

Graficamente sua representação é através de nós e setas, que representam respectivamente os estados que o sistema pode ocupar e as transições entre os estados. Os estados do sistema são geralmente resumidos em uma tabela, onde para cada

componente/subsistema será descrita qual a situação em que se encontram em um determinado instante.

A seguir, na Tabela 3.01 e Figura 3.06, uma ilustração como exemplo destes diagramas e das tabelas de estado:

Tabela 3.01 – Exemplo de estados de um sistema

Estado do Sistema	Componente A	Componente B
0	Falho	Falho
1	Falho	Operacional
2	Operacional	Falho
3	Operacional	Standby

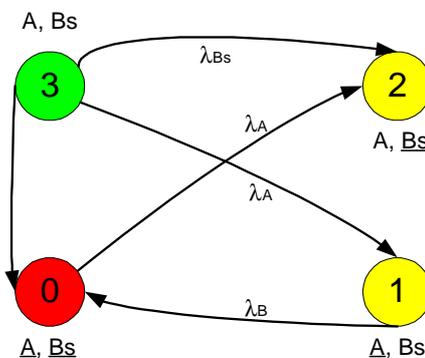


Figura 3.06 – Exemplo de Diagrama De Markov

O processo de Markov é descrito pela função de probabilidade de transição, na forma:

$$P_{j,i}(m,n) = P(X_n = i / X_m = j)$$

que se refere a probabilidade do sistema estar no estado i no momento n, dado que no momento anterior m esteve no estado j.

A taxa de transição é representada através do parâmetro numérico λ_{i → j}, em que i representa o estado de origem do sistema e j o estado destino.

Em termos probabilísticos, a propriedade Markoviana é descrita através da equação:

$$P[X(m+n) = j / X(m) = i, X(u) = x(u)] = P[X(m+n) = j / X(m) = i]$$

para todo $x(u)$ em que $0 \leq u \leq m$. Dado que o sistema está no estado i no instante m , $X(m)=i$, os estados futuros $X(m+n)$ não dependem dos estados anteriores $X(u)$, $u < m$.

A cadeia de Markov é homogênea ou estacionária, se $P_{j,i}(m,n)$ não depende do tempo, mas apenas do intervalo de tempo $(m-n)$:

$$P_{j,i}(n) = P(X_{n+t} = i / X_t = j) = P(X_n = i / X_0 = j) \quad \text{para todo o inteiro } t \geq 0$$

As probabilidades de transição devem satisfazer as seguintes condições:

$$P_{ij}(t) \geq 0; \quad t > 0$$

$$\sum_{j=0}^r P_{ij}(t) = 1; \quad t > 0$$

A equação de Chapman-Kolmogorov fornece um método de cálculo das probabilidades e da matriz de transição em n passos:

$$P_{ij}(m+n) = \sum_{k=0}^r P_{ik}(m) \cdot P_{kj}(n); \quad m, n > 0$$

As taxas de transição λ_{ij} do estado i para o estado j são constantes e o tempo de permanência T_{ij} do sistema no estado i até o estado j é exponencialmente distribuído com parâmetro λ_{ij} . Tais taxas são determinadas a partir de:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[X(t+\Delta t) = j / X(t) = i]}{\Delta t}$$

$$\text{mas, } P[X(m+n) = j / X(m) = i] = P_{ij}(n)$$

$$\text{então: } \lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} P_{ij}(0) = P_{ij}^*(0)$$

As equações de estado são obtidas a partir da equação de Chapman-Kolmogorov. Sendo $\Delta t \in \mathfrak{R}^+$ com valor infinitesimal, cuja probabilidade seja desprezível no intervalo de tempo Δt :

$$P_{ij}(t + \Delta t) = \sum_{k=0}^r P_{ik}(t) \cdot P_{kj}(\Delta t) = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{ik}(t) \cdot P_{kj}(\Delta t) + P_{ij}(t) \cdot P_{jj}(\Delta t)$$

sendo: $P_{jj}(\Delta t) = 1 - \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{jk}(\Delta t)$

substituindo: $P_{ij}(t + \Delta t) = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{ik}(t) \cdot P_{kj}(\Delta t) + P_{ij}(t) \cdot [1 - \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{jk}(\Delta t)]$

que corresponde a: $P_{ij}(t + \Delta t) - P_{ij}(t) = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{ik}(t) \cdot P_{kj}(\Delta t) + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{ik}(t) \cdot P_{kj}(\Delta t)$

dividindo-se por Δt e introduzindo a taxa de

transição: $P_{ij}^*(t) = -P_{ij}(t) \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r \lambda_{jk} + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r P_{ik}(t) \cdot \lambda_{kj}$

Escrita na forma matricial: $T = \begin{bmatrix} -\lambda_{00} & \lambda_{r0} \\ \lambda_{0r} & -\lambda_{rr} \end{bmatrix}$ denominada matriz de transição

As taxas de transição do estado i para o estado j podem também ser escritas como um conjunto de equações diferenciais:

$$\frac{d}{dt} P[X(t) = j] = \sum_i \lambda_{ij} \cdot P[X(t) = i]$$

ou na forma de matriz: $T = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \vdots \\ P[X(t) = r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{00} & \lambda_{r0} \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_{0r} & -\lambda_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \vdots \\ P[X(t) = r] \end{bmatrix}$

Simplificando: $Q^*(t) = T \cdot Q(t)$ Onde $Q^*(t)$ é a derivada do vetor de probabilidade de estado $Q(t)$.

A solução assintótica é utilizada quando apenas as probabilidades estacionárias são importantes, isto é, só aqueles valores de $P_j(t)$ quando $t \rightarrow \infty$. Um conceito interessante a ser analisado dentro deste contexto é o processo chamado irreduzível, onde cada estado é atingível a partir de qualquer outro estado do sistema.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P_j(t) = P_j; j = 0, 1, \dots, n$$

Neste caso os limites existem e são independentes do estado inicial do processo (em $t=0$).

Numa cadeia de Markov irredutível, após um grande número de transições de probabilidade (x_j) do sistema, a probabilidade deste se encontrar no estado j é independente do estado inicial. A cadeia de Markov atinge uma distribuição de equilíbrio, chamada distribuição estacionária. O processo converge para uma condição onde a probabilidade do sistema estar em um determinado estado j é:

$$P_j = P_j(\infty) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P_j(t) \quad \text{para } j=0, 1, \dots, n.$$

Estas probabilidades assintóticas são conhecidas como probabilidades estacionárias, pois $P_j^*(t)$ tende a um valor constante quando $t \rightarrow \infty$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} P_j^*(t) = 0 \quad \text{para } j=0, 1, \dots, r.$$

Nas probabilidades estacionárias $P_j^*(t)$ tende a um valor constante quando $t \rightarrow \infty$, regidas através da seguinte expressão matricial:

$$\begin{bmatrix} -\lambda_{00} & \lambda_{r0} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \lambda_{0r} & -\lambda_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P[X(t) = r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$

Simplificando: $T.P = 0$

Para se utilizar a solução assintótica e obter as probabilidades estacionárias, deve-se utilizar n das $n+1$ equações algébricas lineares obtidas através da expressão matricial acima, aliada ao fato de que soma das probabilidades de estado deve ser igual a 1.

Quando o processo não é irreversível, esta solução não é adequada para aquisição das probabilidades e taxas de transição, devendo ser utilizada a solução transiente.

Disponibilidade do sistema

Considera-se S a denominação de todos os estados possíveis de um sistema, podendo este estar em um determinado momento em uma condição operacional ou indisponível. Sendo D um subconjunto de S , onde os estados são disponíveis ou operacionais, e I outro subconjunto que reúne os estados indisponíveis, então:

$$I = S - D$$

A disponibilidade instantânea do sistema $D(t)$ é a probabilidade de que o sistema esteja em qualquer um dos estados inseridos ao subconjunto D :

$$D(t) = \sum_{k \in D} P_k(t)$$

Consequentemente, a indisponibilidade instantânea $U(t)$ será o complemento:
 $U(t) = 1 - D(t)$

A disponibilidade média (\bar{D}) será a fração de tempo em que se espera que o sistema esteja em um dos estados de D , calculada como o tempo esperado que o sistema passa em D , dividido pelo intervalo de tempo t .

$$\bar{D}(t) = \frac{1}{t} \cdot \sum_{k \in D} \int_0^t P_k(\tau) d\tau$$

Em estados estacionários, pode ser obtida através das propriedades estacionárias:

$$\bar{D}(t) = \sum_{k \in D} P_k$$

Outra definição relevante ao direcionamento deste estudo é o Número Esperado de Falhas (f) e o Número Esperado de Reparos (r) do Sistema. Será a contagem das transições de estados para qualquer um dos estados pertencentes ao subgrupo, no caso de Falhas, subgrupo D e no caso de reparos, subgrupo I, ou seja:

$$f = \sum_{k:i_k \in I} \sum_{j:d_j \in D} \int_0^t P_{dj}(\tau) \cdot \lambda_{djk} \cdot d\tau \quad \text{e} \quad r = \sum_{k:i_k \in I} \sum_{j:d_j \in D} \int_0^t P_{ik}(\tau) \cdot \lambda_{ikdj} \cdot d\tau$$

onde λ_{ikdj} é a taxa de transição do k -ésimo estado i em I, para o j -ésimo estado d em D, d_j .

Confiabilidade do sistema

Existem sistemas que não são capazes de deixar um estado uma vez que entram no mesmo. A estes sistemas utiliza-se o processo de Markov com estados absorventes, que trata de estados que uma vez visitados não será possível passar para um outro em uma mesma missão.

A confiabilidade do sistema $R(t)$ será a probabilidade que o sistema esteja no subconjunto D em um intervalo de tempo $(0,t]$. Se todos os estados falhos são absorventes, não haverá possibilidade de retorno do sistema a uma condição disponível durante o tempo de missão. Calcula-se a confiabilidade do sistema conforme:

$$R(t) = \sum_{K \in D} P_k(t)$$

A confiabilidade média em um intervalo de tempo t é calculada através do tempo esperado que o sistema passa no estado Disponível, dividido pelo intervalo de tempo t :

$$\bar{R} = \frac{1}{t} \sum_{K \in D} \int_0^t P_k(\tau) d\tau$$

Outras definições que se fazem necessárias para avaliação da disponibilidade através de Processos de Markov:

i Número Esperado de Falhas e Número Esperado de Reparos: o Número Esperado de Falhas do sistema (f) em um intervalo de tempo t é calculado como o número esperado de transições de estados dentro do subgrupo disponível D para qualquer um dos estados pertencentes ao subgrupo indisponível I:

$$f = \sum_{k: ik \in I} \sum_{j: dj \in D} \int_0^t P_{dj}(\tau) \cdot \lambda_{djk} \cdot d\tau$$

Onde λ_{djk} a taxa de transição do j-ésimo estado d em D, dj, para o k-ésimo estado i em I, ik.

ii o Número Esperado de Reparos (r) do sistema no intervalo de tempo t é calculado como o número esperado de transições de estados dentro do subgrupo indisponível I para qualquer um dos estados pertencentes ao subgrupo disponível D:

$$r = \sum_{k: ik \in I} \sum_{j: dj \in D} \int_0^t P_{ik}(\tau) \cdot \lambda_{ikd} \cdot d\tau$$

Onde λ_{ikd} a taxa de transição do k-ésimo estado i em I, ik, para o j-ésimo estado d em D, dj.

iii Tempo Falho Total Médio e Tempo Operacional Total Médio do Sistema: o Tempo Falho Total Médio do sistema (TFT) é definido como o tempo esperado que o sistema permanece em qualquer um dos estados pertencentes ao subconjunto indisponível I, entre o período de 0 a t:

$$TFT = \sum_{k \in I} \int_0^t P_k(\tau) d\tau$$

O Tempo Operacional Total Médio do sistema (TOT) é definido como o tempo esperado que o sistema permanece em qualquer um dos estados pertencentes ao subconjunto disponível D entre o período de 0 a t:

$$TOT = \sum_{k \in D} \int_0^t P_k(\tau) d\tau = t - TFT$$

iv Duração Média da Falha do sistema (U): é definida como o tempo médio desde o momento em que o sistema entra no estado indisponível, pertencente ao subgrupo I, até que o mesmo seja reparado e trazido de volta para um estado disponível no subgrupo D.

$$U = \omega_F T_S$$

Onde T_S é a duração média de uma falha do sistema e ω_F a frequência de falhas;

v Tempo Médio Entre Falhas do Sistema (MTBF - *Mean Time Between Failure*): trata-se do tempo médio entre falhas sucessivas de um estado do subgrupo disponível D, para um estado em que o sistema se encontra indisponível, subgrupo I. É calculado a partir do intervalo de tempo médio entre reparos:

$$MTBF = \int_0^{\infty} D(t) dt$$

A próxima seção apresenta a Metodologia Bayesiana e como esta ferramenta será utilizada no desenvolvimento do trabalho.

3.5 Metodologia Bayesiana

O objetivo desta seção é apresentar a Metodologia Bayesiana, os conceitos envolvidos no modelo e sua aplicação no cenário em estudo. Esta metodologia será utilizada com a finalidade de determinar as taxas de transição do sistema, que em virtude de ser uma tecnologia ainda em desenvolvimento, há escassez de dados relevantes do sistema em operação.

3.5.1 Interpretação de Probabilidade

Existem duas linhas de pensamento relativo ao significado e aplicações de probabilidade: a freqüentista e a subjetiva. A probabilidade freqüentista ou clássica, é o limite da freqüência relativa da ocorrência de um evento quando este é o resultado de interesse, através de seqüências longas de repetições de um determinado evento. A probabilidade de um evento E é dada por:

$$\Pr(E) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_E}{N}$$

Onde :

N_E é o número total de vezes que o evento E ocorre;

N é o número total de tentativas;

$\Pr(E)$ é a razão se este limite existe.

Na linha de pensamento subjetivista ou Bayesiana, a probabilidade é o grau de confiança ou incerteza, na verdade de uma determinada proposição. Podendo esta proposição ser a princípio provada verdadeira ou falsa. São dados geralmente oriundos do conhecimento e/ou informações que uma pessoa pode ter sobre uma proposição ou evento, porém sem o fundamento de dados estatísticos.

A interpretação subjetiva permite a incorporação destas situações de incerteza no tratamento de dados. A incerteza provém de vários aspectos, a exemplo do conhecimento imperfeito de um especialista ou dados oriundos de sistemas semelhantes. Atualmente a probabilidade subjetiva é uma ferramenta amplamente empregada na tomada de decisões em situações de incerteza.

3.5.2 Teoria Bayesiana

A Metodologia Bayesiana, que segue a linha de pensamento subjetiva, é indicada para o tratamento destas situações de incerteza. Tem a capacidade de

incorporar diversos tipos de dados ao processo, como dados oriundos de opiniões de especialistas, de banco de dados, dados oriundos de testes, de sistemas semelhantes e dados de operação (caso estejam disponíveis).

Pode ser traduzida como uma maneira formalizada de explicitar o conhecimento *a priori* existente na formulação de distribuições de probabilidade de algum parâmetro de interesse, como também a atualização de dados à medida que novas informações mais apropriadas e evidências sobre a hipótese se tornam disponíveis, modificando e aprimorando nosso estado de conhecimento sobre uma determinada grandeza.

É de relevante importância em situações que poucos ou nenhum dado está disponível, possibilitando quantificar o conhecimento subjetivo oriundo de engenheiros/projetistas ou outra pessoa conhecedora das características de projeto, manufatura e operação do sistema em questão (especialistas), assim como outras fontes de dados.

A avaliação Bayesiana consiste na atualização de distribuições *a priori* baseado em evidências obtidas de sistemas. O resultado desta atualização é a distribuição *a posteriori*, que reflete do estado atualizado de incerteza sobre o parâmetro de interesse.

Uma das desvantagens no tratamento de dados utilizando Bayes é o cuidado que deve-se disponibilizar com informações otimistas ou pessimistas, oriundas de conhecimento de especialistas e demais dados disponíveis. Pois mesmo a base da probabilidade subjetiva sendo regida pelas leis de probabilidade, que forçam de uma certa maneira os resultados numéricos a convergir com os resultados da estatística clássica, só têm esta liberdade condicional os tratamentos que possuem uma grande quantidade de dados. Deve-se observar o tratamento adequado a ser fornecido aos dados, por exemplo, uma população não-homogênea não deve ser tratada como homogênea, pois este otimismo pode fornecer resultados marginais à realidade.

Dentre as vantagens em utilizar o método pode-se citar (Droguett, 2002):

- a redução de custos, devido à utilização de quaisquer dados disponíveis e não apenas dados estatísticos;
- informação realística para tomada de decisões, devido à incorporação de incertezas melhorando a qualidade da informação;

- atualização de dados à medida que uma nova informação se torna disponível, permitindo combinar dados de operação com outras informações relevantes que estejam disponíveis.

3.5.3 Teorema de Bayes

O teorema de Bayes é a maneira de analisar dados e atualizá-los à medida que uma nova informação se torna disponível. Uma visão geral do teorema, com relação a parâmetros discretos, pode ser apresentada através da teoria de probabilidade. Dado um determinado evento A, e dado B sendo este a representação de alguma nova informação relevante a avaliação de A, o teorema de Bayes estabelece que a probabilidade do evento A, dada a nova evidência B, pode ser definida por:

$$P\{A/B\} = \frac{P\{B/A\}P\{A\}}{P\{B\}}$$

Onde:

$P\{A\}$ é nomeada como probabilidade *a priori* de A, isto é, antes que a nova informação (B) se torne disponível;

$P\{B/A\}$ é a probabilidade de que a evidência B seja observada, se A é realmente verdadeiro (ocorre), conhecida por verossimilhança;

$P\{A/B\}$ é a probabilidade *a posteriori* de A, após a informação B se tornar disponível;

Na avaliação de atributos de parâmetro contínuo, o teorema de Bayes é definido por:

$$\pi_1(\theta/E) = \frac{L(E/\theta)\pi_0(\theta)}{\int_{\theta} L(E/\theta)\pi_0(\theta)d\theta}$$

Onde:

θ representa o parâmetro de interesse e/ou de incerteza;

$\pi_0(\theta)$ é a função de densidade probabilidade *a priori*, antes de observar a nova evidência E sobre θ ;

$L(E/\theta)$ é a função verossimilhança; é a probabilidade condicional da observação E, dado θ ter ocorrido;

$\pi_1(\theta/E)$, é a função de densidade probabilidade *a posteriori* de θ depois de obtido E;

A integral no denominador assegura que $\pi_1(\theta/E)$ integra a unidade em cima de todos possíveis valores de θ .

3.5.4 Tratamento de dados

A distribuição *a priori* reflete as convicções do analista relativo a um estado de conhecimento atual, antes de ocorrer a atualização da evidência. Pode ser, em alguns casos, a distribuição *a posteriori* antes do último cálculo de atualização. São geralmente representadas por distribuições Beta, Gamma, Normal ou Lognormais. A seguir, com mais detalhes, as distribuições de maior relevância neste trabalho:

- Distribuição Beta:

É utilizada para representar distribuições *a priori* em estudos de confiabilidade Bayesiana. Seu formato irá depender dos valores atribuídos aos parâmetros de distribuição a e b. Geralmente empregada na análise de probabilidades de falha. Sua função de densidade probabilidade é apresentada por:

$$B(x/a, b) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad \text{onde } (0 \leq x \leq 1) \text{ e } b > a > 1$$

- Distribuição Gamma:

É utilizada em problemas onde o tempo de ocorrência de um evento é importante, como por exemplo a modelagem de tempo de falha. Tem parâmetros de distribuição de escala (α) e de forma (β). Ambos não negativos e é representada por:

$$G(x/\alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad \text{onde } (0 \leq x \leq \infty) \text{ e } \Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \text{ para } \alpha \geq 0$$

- **Distribuição Lognormal:**

É apropriada para aplicações envolvendo tempo de falha de sistemas, cujas falhas recentes dominam o comportamento do processo de falha, ou seja, a maioria das probabilidades de falha concentra-se para valores iniciais do tempo operacional. É indicada na modelagem de sistemas que apresentam desgaste (stress, fadiga e corrosão). Também é uma distribuição adequada para análises em mantabilidade. É representada por:

$$Ln(x/\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \ln \mu}{\sigma} \right]^2 \quad \text{onde } (0 \leq x \leq \infty), (-\infty \leq \mu \leq \infty), \sigma^2 > 0$$

A construção da função verossimilhança requer conhecimentos específicos do processo a ser modelado, bem como que tipo de distribuição de probabilidade será apropriado para modelagem. As distribuições Binomial, Poisson, Normal e Lognormal são geralmente as mais utilizadas na representação da verossimilhança. As distribuições de maior relevância neste trabalho são:

- **Distribuição Binomial:**

É geralmente utilizada para modelar processos na qual eventos são baseados na demanda. Indicada para tratamento de eventos independentes e sistemas onde não existe desgaste, ou seja, são atributos constantes com o passar do tempo. Apresentada na forma:

$$\Pr(k/N, x) = \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \quad \text{onde } \binom{N}{k} = \frac{N!}{(N-k)!k!}$$

k significa o número de vezes que o evento de interesse ocorre em n oportunidades;

- **Distribuição Poisson:**

É comumente usada para modelar processos com base no tempo, assumindo que os eventos de interesse estão aleatoriamente e igualmente dispersados no tempo. Também indicada para tratamento de eventos independentes e sistemas onde não existe desgaste. Sendo λT o parâmetro da distribuição de probabilidade temos:

$$\Pr(k/T, \lambda) = \frac{(\lambda T)^k e^{-\lambda T}}{k!}$$

onde k significa o número de eventos em T unidades de tempo, dado a taxa de ocorrência do evento λ .

3.5.5 Pares conjugados

Determinadas famílias de distribuição paramétricas, quando utilizadas como distribuições de probabilidade *a priori* em conjunto com tipos específicos de funções de verossimilhança, na modelagem por Bayes, fornecem distribuições *a posteriori* resultantes da mesma família. São chamados distribuições conjugadas os parâmetros de distribuição *a posteriori*, resultantes de funções simples dos parâmetros de distribuição *a priori* e da função verossimilhança, como apresentadas no exemplo a seguir: (Droguett, 2002)

Tabela 3.02 – Pares Conjugados

Distribuição <i>a Priori</i>	Função de Verossimilhança	Distribuição <i>a Posteriori</i>
Beta	Binomial	Beta
Gamma	Poisson	Gamma
Lognormal	Lognormal	Lognormal

- Par Beta-Binomial:

É a distribuição Beta *a priori* conjugada com a distribuição Binomial usada para representar a verossimilhança, utilizada normalmente para estimação de probabilidades de falha. Pelo teorema de Bayes temos:

$$\text{Distribuição } a \text{ posteriori} = \frac{P(k/N, x)(x/a, b)}{\int_0^1 P(k/N, x)(x/a, b) dx} =$$

$$= \frac{\binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \cdot \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}}{\int_0^1 \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \cdot \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx} = \frac{x^{k+a-1} (1-x)^{N-k+b-1}}{\int_0^1 x^{k+a-1} (1-x)^{N-k+b-1} dx}$$

Usando o artifício: $a' = a + k$ temos: $\frac{x^{a'-1} (1-x)^{b'-1}}{\int_0^1 x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx}$
 $b' = N - k + b$

Sendo a distribuição Beta uma distribuição densidade probabilidade, então:

$$\int_0^1 \frac{\Gamma(a' + b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx = 1 \text{ então: } \int_0^1 x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx = \frac{1}{\frac{\Gamma(a' + b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')}}$$

Por fim, a distribuição à posteriori é dada por:

$$B(a', b') = \frac{\Gamma(a' + b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} x^{a'-1} (1-x)^{b'-1}$$

▪ Par Gamma-Poisson:

É a distribuição Gamma *a priori* conjugada com a distribuição Poisson que representa a verossimilhança, utilizada geralmente para estimação de taxas de falhas de sistemas. Através da mesma metodologia aplicada ao par Beta-binomial, chega-se a seguinte expressão da distribuição *a posteriori*:

$$G'(\lambda / \alpha', \beta') = \frac{\beta'^{\alpha'}}{\Gamma(\alpha')} \lambda^{\alpha'-1} e^{-\beta'\lambda} \quad \text{onde } \alpha' = \alpha + k$$

$$\beta' = \beta + T$$

▪ Par Lognormal-Lognormal:

É a distribuição Lognormal *a priori* conjugada a outra distribuição Lognormal representando a verossimilhança. Normalmente empregada para estimar taxas de falha quando os dados são provenientes de opinião de especialista. Analogamente ao desenvolvimento da expressão anterior, a distribuição *a posteriori* é dada por:

$$Ln(x/\mu', \sigma') = \frac{1}{\sigma' x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \ln \mu'}{\sigma'} \right]^2 \right]$$

3.5.6 Tratamento de dados de populações homogêneas

São chamadas populações homogêneas aquelas cujos membros são identificados com respeito a uma determinada característica de interesse. Por exemplo, se todos os membros de uma população de componentes tiverem a mesma taxa de falha, então a população é considerada homogênea com relação à característica taxa de falha. Neste cenário, dados originados de um subconjunto da população podem ser utilizados para atualizar o estado de conhecimento de outros subconjuntos da população.

O tratamento de dados provido de populações homogêneas pode ser realizado através da atualização seqüencial utilizando Bayes, ou seja, pode ser realizado em etapas em que diversas porções de informações se tornam disponíveis, ou mesmo podem ser agregada, e aplicando uma única vez o teorema de Bayes. O resultado final da distribuição *a posteriori* é o mesmo, independente se foi obtidos, em etapas ou de uma única vez para o total de informações.

A seguir, apresenta-se um exemplo de atualização seqüencial de uma distribuição contínua de probabilidade para melhor explanar o assunto:

Utilizou-se um componente testado em um teste 01 durante 2000 horas, e em um teste 02 por 8000 horas. Não houve falhas durante a realização do teste 01, porém durante o teste 02 uma falha foi observada. Admitindo-se que a distribuição *a priori* seja uma Gamma com parâmetros $\alpha=1$ e $\beta=100$, isto é, *priori* $= G(x/\alpha=1, \beta=100)$ temos:

Solução: admitindo que a verossimilhança será representada pela distribuição Poisson, utilizando os resultados do primeiro teste como evidência e os parâmetros de distribuição resultante *a posteriori* Gamma, temos:

$$\Pr(k_1 = 0 / T_1 = 2000, \lambda)$$

$$\alpha' = \alpha + K_1 = 1 + 0 = 1$$

$$\beta' = \beta + T_1 = 100 + 2000 = 2100$$

A próxima etapa será a utilização da *posteriori* como *priori* e a atualização se dará com a inclusão dos dados oriundos do teste 02:

$$G'(\lambda / \alpha' = 1, \beta' = 2100)$$

A verossimilhança dada por: $\Pr(K_2 = 1 / T_2 = 8000, \lambda)$

Os parâmetros da distribuição *a posteriori*, após a segunda atualização, são:

$$\alpha'' = \alpha' + K_2 = 1 + 1 = 2$$

$$\beta'' = \beta' + T_2 = 2100 + 8000 = 10100$$

Caso o teorema de Bayes fosse utilizado em uma só etapa agregando-se os dados obtidos durante a fase de testes, o mesmo resultado seria obtido:

Solução: a evidência total, com relação à observação de falhas do componente, seria:

$$K = K_1 + K_2 = 0 + 1 = 1$$

$$T = T_1 + T_2 = 2000 + 8000 = 10000$$

Sendo a distribuição *a priori* de parâmetros $\alpha = 1$ e $\beta = 100$, a evidência acumulada pode ser apresentada através de uma única aplicação de Bayes:

$$\Pr(K = 1 / T = 10000)$$

Os parâmetros resultantes da distribuição *a posteriori* são:

$$\alpha'' = \alpha' + K = 1 + 1 = 2$$

$$\beta'' = \beta' + T = 100 + 10000 = 10100$$

3.5.7 Tratamento de dados de populações não homogêneas

A maioria dos sistemas, na prática, não tem uma característica de interesse semelhante. Estes sistemas trabalham em condições ambientais diferentes, foram projetados e operam de forma diferente, podendo ter diferentes modos de falha e diferentes taxas de falha e reparo.

Não é realístico tratar estas informações com a mesma modelagem de populações homogêneas, pois neste caso temos uma população composta por diferentes amostras, com medidas de confiabilidade distintas. Existe uma variabilidade de medidas, como por exemplo a taxa de falha, diferente de amostra para amostra, compondo uma mesma população. Esta variabilidade de medidas de confiabilidade é uma característica do sistema, não se modifica aumentando a quantidade de dados (evidências) do parâmetro de interesse.

A representação da distribuição de taxas de falhas ou probabilidades de falhas entre um grupo de sistemas na forma de uma distribuição de probabilidade é chamada distribuição de variabilidade populacional.

A verdadeira distribuição de variabilidade populacional pode ser apresentada como um membro de uma determinada família de modelos de distribuição paramétrica. Quando existe incerteza na proposição da distribuição de variabilidade populacional, esta incerteza é expressada na forma de uma distribuição de probabilidade sobre os membros da mesma família de modelos de distribuição paramétrica. Uma possível estimativa da densidade variabilidade populacional é dada pela média:

$$\hat{p}(x) = \int \dots \int_{\theta_1, \dots, \theta_r} \varphi(x/\theta_1, \dots, \theta_r) \cdot \pi(\theta_1, \dots, \theta_r) \cdot d\theta_1, \dots, d\theta_r$$

que consiste na representação de uma ‘mistura’ de distribuições do modelo escolhido, onde o modelo da distribuição de variabilidade paramétrico é representado por $\varphi(x) = \varphi(x/\theta_1, \dots, \theta_r)$ e $\pi(\theta_1, \dots, \theta_r)$ representa a incerteza sobre a distribuição de variabilidade populacional.

A análise da distribuição de variabilidade populacional, também conhecida como *Two States Bayes*, pode ser utilizada como uma técnica para construção da distribuição *a priori* do parâmetro de confiabilidade, baseada seguindo alguns tipos de informação tais como:

- E_0 - análise de estados de conhecimento *a priori*, obtidos de experiência de engenheiros com o sistema em estudo;
- E_1 - dados de exposição, obtidos em experiências de operação com sistemas semelhantes em aplicações similares;
- E_2 - distribuições baseadas em banco de dados de confiabilidade e opiniões de especialistas.

A análise Bayesiana da variabilidade populacional, tem a capacidade de utilizar dados oriundos de quaisquer das três fontes descritas acima, bem como agregar tais valores permitindo uma melhor avaliação do sistema.

Dada a distribuição de probabilidade $\pi(\theta_1, \dots, \theta_r / E_0, E_1, E_2)$, onde (E_0, E_1, E_2) são informações relativas a um sistema de interesse (x), sobre o modelo de variabilidade paramétrico $\varphi(x / \theta_1, \dots, \theta_r)$, tem-se, então, a distribuição de X , condicional a E_0, E_1, E_2 dada a evidência (nova informação sobre o sistema) E_3 e, dada por:

$$\pi(x / E_0, E_1, E_2, E_3) = \frac{P(E_3 / x, E_0, E_1, E_2) \cdot \int_{\underline{\theta}} \varphi(x / \underline{\theta}) \cdot \pi(\underline{\theta} / E_0, E_1, E_2) \cdot d\underline{\theta}}{\int_x P(E_3 / x, E_0, E_1, E_2) \cdot \int_{\underline{\theta}} \varphi(x / \underline{\theta}) \cdot \pi(\underline{\theta} / E_0, E_1, E_2) \cdot d\underline{\theta} dx}$$

onde $\underline{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_r)$.

A distribuição *a posteriori* da população de variabilidade paramétrica baseada nos dados E_0, E_1, E_2 é obtida através da aplicação do teorema de Bayes:

$$\pi(\underline{\theta} / E_0, E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0) \cdot \pi_0(\underline{\theta} / E_0)}{\int_{\underline{\theta}} P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0) \cdot \pi_0(\underline{\theta} / E_0) d\underline{\theta}}$$

onde $P(E_1, E_2 / \underline{\theta}, E_0)$ é a verossimilhança da informação, e $\pi_0(\underline{\theta} / E_0)$ é a distribuição de probabilidade *a priori* em $\underline{\theta}$.

Para analisar a variabilidade populacional de uma medida de confiabilidade, é necessário especificar uma distribuição de probabilidade apropriada para descrever a medida de variabilidade de interesse $\phi(x / \underline{\theta})$, como também a construção da verossimilhança $L(E / \underline{\theta})$.

Diferentes distribuições de verossimilhança podem ser empregadas dependendo da natureza da evidência, por exemplo:

- E_1 : sendo a avaliação da variabilidade populacional de uma medida de interesse, como por exemplo a taxa de falha (λ) de um determinado componente; a evidência $\{(K_i, T_i), i = 1, \dots, n\}$ é adquirida através da observação do número de falhas (K_i), do tempo de missão (T_i) e do número total de amostras (n). A distribuição de verossimilhança, descrevendo esta evidência, pode ser uma distribuição de Poisson:

$$P(K_i, T_i / \lambda) = \frac{(\lambda T_i)^{K_i}}{K_i!} e^{-\lambda T_i}$$

Porém, λ é um dos possíveis valores da taxa de falha,

representada pela distribuição de variabilidade populacional $\phi(\lambda / \underline{\theta})$. Então, calcula-se a verossimilhança média sobre os possíveis valores de λ :

$$L(k_i, T_i / \underline{\theta}) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda T_i)^{K_i}}{K_i!} e^{-\lambda T_i} \phi(\lambda / \underline{\theta}) d\lambda$$

Se a distribuição de variabilidade populacional for uma distribuição Gamma, com parâmetros α e β , tem-se a verossimilhança Gamma-Poisson, representada por:

$$L(k_i, T_i / \alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda T_i)^{K_i}}{K_i!} e^{-\lambda T_i} \frac{\lambda^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \beta^\alpha e^{-\beta\lambda} d\lambda = \frac{T_i \Gamma(\alpha + K_i) \beta^\alpha}{K_i! \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta + T_i)^{\alpha + K_i}}$$

- E_2 : caso a evidência da taxa de falha seja obtida através de opinião de um especialista (λ_i), onde σ_i é o logaritmo que representa a incerteza do especialista em sua proposição. Utilizando-se a distribuição Lognormal para representar a verossimilhança e se a distribuição de variabilidade populacional for outra distribuição

Lognormal, com parâmetros μ e σ , tem-se a verossimilhança Lognormal-Lognormal, representada por:

$$L(\lambda_i, \sigma_i / \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma^2}}} \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \lambda_i - \ln \mu}{\sigma^2 + \sigma_i^2} \right)^2}}{\sigma_i^2 \sigma \lambda_i \sqrt{2\pi}}$$

- E₃: caso a evidência da taxa de falha seja obtida através de situações onde vários dados providos de origens diferentes, como dados de testes (K_i, T_i) , dados de opinião de especialistas (λ_i, σ_i) , etc., diferentes verossimilhanças podem ser construídas de acordo com a natureza da evidência e com a escolha da distribuição variabilidade populacional originando em uma ‘mistura’ de verossimilhanças:

Tabela 3.03 – Mistura de Verossimilhanças

Priori/Evidência	(K_i, T_i)	(λ_i, σ_i)	(K_i, D_i)
Gamma	Gamma-Poisson-Lognormal		
LogNormal	Lognormal-Poisson-Lognormal		
		Lognormal-binomial-Lorgnormal	
Beta		Beta-Binomial-Lognormal	

3.5.8 Mistura de funções verossimilhanças

É uma técnica utilizada para melhor representar a função verossimilhança em análises de variabilidade populacional de uma medida de confiabilidade de interesse, onde é utilizado um conjunto de distribuições possíveis conjugadas para construção de uma função verossimilhança misturada, ao invés de utilizar uma única “melhor” distribuição para representação do modelo.

É geralmente utilizada em situações em que poucos dados de exposição são disponíveis ou não se encontram disponíveis. Neste caso, dados de opiniões de especialistas constituem uma valiosa informação, como também dados estimados de banco de dados de confiabilidade.

Modelo Lognormal-Poisson-Lognormal

Sendo a medida de interesse a variabilidade populacional de um item taxa de falha (λ), e a fonte disponível de evidência, são dados observados do sistema em operação $\{(K_i, t_i), i = 1, \dots, n\}$ e estimativas de incerteza Λ dada por diferentes fontes (λ_i^*, σ_i) , onde λ_i^* são estimativas providas das fontes em Λ e σ_i representa o logaritmo básico de divergência de estimativa λ_i^* . Considera-se que a incerteza Λ da variabilidade populacional é dada por uma distribuição Lognormal, por exemplo:

$$\varphi(\lambda/v, \tau) = \frac{1}{\lambda\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\lambda - \ln v}{\tau}\right)^2} \quad [1]$$

Então, a posteriori da variabilidade populacional paramétrica pode ser escrita por:

$$\pi(v, \tau / E_0, E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2 / E_0, v, \tau) \cdot \pi_0(v, \tau / E_0)}{\int \int_{v \tau} P(E_1, E_2 / E_0, v, \tau) \cdot \pi_0(v, \tau / E_0) \cdot dv \cdot d\tau} \quad [2]$$

A construção da verossimilhança do tipo informação E_1 , $P(E_{1i}, \underline{\theta}, E_0)$ para o i -th sistema, será dada por:

Caso seja conhecida a taxa de falha $\lambda_i = \lambda$ de cada sistema, pode-se usar a distribuição Poisson para estimar a verossimilhança da observação de K_i falhas em T_i :

$$P(K_i / t_i, \lambda, E_0) = \frac{(\lambda t_i)^{K_i} \cdot e^{-t_i \lambda}}{\Gamma(K_i + 1)} \quad [3]$$

Seguindo o modelo de erros multiplicativos de Mosleh (1983), a função verossimilhança para a i -th fonte estimada, $P(E_{2i}, \underline{\theta}, E_0)$, pode ser escrita em termos de um distribuição Lognormal com média $\ln \lambda$, por exemplo:

$$P(\lambda_i^* / \sigma_i, \lambda, E_0) = \frac{1}{\sigma_i \lambda_i^* \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda_i^* - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} \quad [4]$$

onde considera-se um dado obtido de um especialista imparcial, isto é, uma pessoa que não tem uma estaca pessoal na situação que é analisada (Mosleh,1983).

Se $\mu_i = \ln \lambda_i^*$, reescreve-se a equação acima na forma:

$$P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) = P(\lambda_i^* / \sigma_i, \lambda, E_0) \left| \frac{d\lambda_i^*}{d\mu_i} \right|$$

e contanto que $\left| \frac{d\lambda_i^*}{d\mu_i} \right| = e^{\mu_i}$,

$$P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) = \frac{1}{\sigma_i e^{\mu_i} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2} \cdot e^{\mu_i}$$

então,

$$P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2} \quad [5]$$

que é a distribuição normal com significado igual a $\ln \lambda$.

Como só se sabe que λ é um dos possíveis valores da taxa de falha representada pela distribuição de variabilidade populacional $\varphi(\lambda / \theta)$, tem-se a verossimilhança média dada pela equação abaixo sobre todos os possíveis valores de λ em ordem para calcular a probabilidade de dados incondicionais no desconhecido valor de λ :

$$P(K_i, t_i, \mu_i, \sigma_i / \nu, \tau, E_0) = \int_{\lambda} P(K_i / t_i, \lambda, E_0) \cdot P(\mu_i / \sigma_i, \lambda, E_0) \cdot \varphi(\lambda / \nu, \tau) d\lambda \quad [6]$$

onde consideram-se dados observados durante períodos de operação e evidências estimativas como independentes. Note também que a i-th estimativa do especialista λ_i^* é para o mesmo i-th sistema para qual dados de operação (k_i, t_i) foram observados.

Substituindo a equação [1] e [5] pela equação [6] tem-se:

$$P_i = \int_{\lambda} P(K_i / t_i, \lambda, E_0) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{\ln \lambda - \ln \nu}{\tau} \right)^2 \right]} \cdot d\lambda \quad [7]$$

Uma possível solução para equação [7] pode ser obtida se escrever:

$$e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2 + \left(\frac{\ln \lambda - \ln \nu}{\tau}\right)^2\right]} \text{ como } e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2}$$

Desta forma, pode-se mostrar que:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}}} \text{ e } \mu_i = \frac{\frac{\nu}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad [8]$$

Então, a função verossimilhança dada pela equação [7] se torna:

$$P_i = \int_{\lambda} \frac{(\lambda.t_i)^{K_i} . e^{-t_i.\lambda}}{\Gamma(K_i + 1)} . \frac{1}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2 + \left(\frac{\ln \mu_i - \ln \nu}{\sigma_i + \tau^2}\right)^2\right]} . d\lambda$$

que após uma manipulação algébrica se torna:

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \nu}{\sigma_i + \tau^2}\right)^2}}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} \int_{\lambda} \frac{\lambda^{K_i-1} . t_i^{K_i} . e^{-t_i.\lambda}}{\Gamma(K_i + 1)} . e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} . d\lambda \quad [9]$$

Note que a equação anterior pode também ser escrita como um produto de uma distribuição Gamma e uma Lognormal. Realmente,

$$I = \frac{\sigma_i e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \nu}{\sigma_i + \tau^2}\right)^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_i\tau_i\lambda}} \int_{\lambda} \frac{\lambda^{(K_i-1)+1} . t_i^{K_i+1} . e^{-t_i.\lambda}}{\Gamma(K_i + 1)} . \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i\lambda}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} . d\lambda$$

Substituindo-se a expressão para μ_i e σ_i dada pela equação [8], tem-se:

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln \nu}{\sigma_i + \tau^2}\right)^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_i\tau_i\lambda} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int Ga(\lambda / K_i + 1, t_i) . LN \left(\lambda \frac{\frac{\nu}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}, \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \right) . d\lambda \quad [10]$$

No caso de estimativas de fonte, como experiência de engenheiros, considera-se as fontes ser independentes.

Caso especial: Modelo Lognormal-Poisson

Se só dados de operação estão disponíveis, então a equação [10] se torna:

$$P_i = \frac{\Gamma(K_i)}{\Gamma(K_i+1)} \int_{\lambda} \frac{\lambda^{K_i-1} \cdot t_i^{K_i} \cdot e^{-t_i \cdot \lambda}}{\Gamma(K_i)} \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\lambda \tau \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \lambda - \ln v}{\tau} \right)^2} \cdot d\lambda$$

isso corresponde a um produto entre uma Gamma e uma distribuição de Lognormal, por exemplo:

$$P_i = \frac{\Gamma(K_i)}{\Gamma(K_i+1)} \int_{\lambda} \lambda \cdot Ga(\lambda / K_i, t_i) \cdot LN(\lambda / v, \tau) \cdot d\lambda$$

Caso especial: Modelo Lognormal- Lognormal

Se só dados de estimativas de especialistas estão disponíveis (dados obtidos observando o tempo percorrido), então a equação [10] pode ser escrita como segue:

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln \mu_i - \ln v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{\sigma_i \tau \sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int_{\lambda} \frac{1}{\sigma_i' \lambda \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \mu_i' - \ln \lambda}{\sigma_i'} \right)^2} \cdot d\lambda$$

Note que a integral da equação anterior é uma função densidade probabilidade Lognormal, $LN(\lambda / \mu_i', \sigma_i')$, que integra a 1. Assim,

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln \mu_i - \ln v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{\sigma_i \tau \sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}}$$

Modelo Lognormal- Binomial-Lognormal

O interesse agora é na avaliação da probabilidade de falha de um item, $q(0 \leq q \leq 1)$. Consideram-se dois tipos de informação baseadas em dados $\{(K_i, t_i), i = 1, \dots, n\}$ e estimativas na incerteza de Q, dado por diferentes fontes (q_i^*, σ_i) , onde q_i^* é a estimativa das fontes em Q e σ_i é o logaritmo básico divergência de estimativa q_i^* .

A variabilidade populacional da probabilidade de falha é considerada uma distribuição Lognormal,

$$\varphi(q/v, \tau) = \frac{1}{q\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln q - \ln v}{\tau}\right)^2} \quad [11]$$

Para avaliar a distribuição a posteriori da variabilidade populacional paramétrica, precisa-se avaliar a equação [2], mas, para a construção da função verossimilhança devem-se levar em conta os dados de exposição baseados na demanda, ao invés de dados observados de tempo percorrido de operação. Similarmente ao caso anterior, a verossimilhança para dados baseados na demanda são dados por uma distribuição Binomial como segue:

$$P(K_i / n_i, q, E_0) = \frac{\Gamma(n_i + 1)}{\Gamma(K_i + 1)\Gamma(n_i - K_i + 1)} q^{K_i} (1 - q)^{n_i - K_i} \quad [12]$$

e por uma distribuição Lognormal [5] para as fontes estimadas, onde escreve-se a probabilidade de falha q em lugar da taxa de falha λ . Para o i -th sistema, a função verossimilhança misturada pode então ser escrita como:

$$P_i(K_i, d_i, \mu_i, \sigma_i / v, \tau, E_0) = P_i = \frac{1}{c} \int_q P(K_i / d_i, q, E_0) \cdot P(\mu_i / \sigma_i, q, E_0) \cdot \varphi(q/v, \tau) dq \quad [13]$$

onde c é o fator normalização dado por:

$$c = \int_0^1 \frac{1}{q\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln q - \ln v}{\tau}\right)^2}$$

Substituindo equações [11],[12] e [5] na equação [13] a verossimilhança para o i-th sistema se torna:

$$P_i = \frac{1}{c} \frac{e^{-\frac{1}{2}\frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{\sigma_i\tau\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int_q \frac{\Gamma(n_i + 1)}{\Gamma(K_i + 1)\Gamma(n_i - K_i + 1)} q^{K_i} (1 - q)^{n_i - K_i} \cdot \frac{1}{q\sigma_i'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i' - \ln q}{\sigma_i'}\right)^2} dq$$

o qual, após de uma manipulação algébrica, pode ser escrito como:

$$P_i = \frac{1}{c} \frac{\Gamma(n_i + 1) e^{-\frac{1}{2}\frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{\Gamma(n_i + 2) \sigma_i\tau\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int_q \frac{\Gamma(n_i + 1)}{\Gamma(K_i + 1)\Gamma(n_i - K_i + 1)} q^{K_i} (1 - q)^{n_i - K_i} \cdot \frac{1}{q\sigma_i'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i' - \ln q}{\sigma_i'}\right)^2} dq$$

[14]

Nota-se que a equação [14] pode também ser escrita como um produto entre uma distribuição Beta e uma Lognormal:

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{c(n_i + 1) \sigma_i\tau\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int Be(q / K_i + 1, n_i - K_i + 1).LN(q / \mu_i', \sigma_i') dq. \quad [15]$$

Caso especial: Modelo Lognormal-Binomial-Lognormal

Quando se tem apenas demanda baseada em dados, o modelo misturado de verossimilhança Lognormal-Binomial-Lognormal reduz o denominado modelo Lognormal-Binomial. Dada pela equação [15], escrita como:

$$P_i = \frac{1}{c} \int_q \frac{\Gamma(n_i + 1)}{\Gamma(K_i + 1)\Gamma(n_i - K_i + 1)} q^{K_i} (1 - q)^{n_i - K_i} \cdot \frac{1}{q\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln q - \ln v}{\tau}\right)^2} dq$$

onde, como o resultado da falta de informações de estimativas de fontes (bancos de dados de confiabilidade) pode-se ter um produto entre uma distribuição binomial, representando a função verossimilhança da demanda baseada em dados, e um distribuição Lognormal, a qual descreve a variabilidade populacional da incerteza Q.

Mostra-se que a equação se torna:

$$P_i = \frac{1}{c(n_i + 1)} \int_q \int_q \frac{\Gamma(n_i + 2)}{\Gamma(K_i + 1)\Gamma(n_i - K_i + 1)} q^{(K_i + 1) - 1} (1 - q)^{(n_i - K_i + 1) - 1} \cdot \frac{1}{q\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln q - \ln v}{\tau}\right)^2} dq. \quad [16]$$

Pelo qual pode-se também ser escrever:

$$P_i = \frac{1}{c(n_i + 1)} \int_q Be(q / K_i + 1, n_i - K_i + 1).LN(q / v, \tau) dq. \quad [17]$$

Caso especial: Modelo Lognormal- Lognormal

Se, por outro lado, só fontes estimadas são disponíveis, então a equação [15] se torna:

$$P_i = \frac{1}{c} \int_q \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \mu_i - \ln q}{\sigma_i}\right)^2} \cdot \frac{1}{q\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln q - \ln v}{\tau}\right)^2} dq$$

Utilizando-se o resultado do modelo Lognormal-Poisson-Lognormal, tem-se:

$$P_i = \frac{1}{c} \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_i - v}{\sigma_i^2 + \tau^2}\right)^2}}{\sigma_i\tau\sqrt{2\pi}\sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \quad [18]$$

Que corresponde ao modelo Lognormal-Lognormal.

3.5.9 Utilização de Bayes e Markov na modelagem da malha de CI

Devido às malhas de CI possuírem características de um sistema dinâmico e complexo, onde vários estados de um mesmo componente podem ocorrer, o método proposto para melhor representar as características de confiabilidade e disponibilidade do sistema foi o Modelo de Markov.

O principal objetivo da sua utilização neste trabalho é a determinação da probabilidade de o sistema estar no estado degradado ou operacional, isto é, disponível. Para aquisição das métricas de confiabilidade serão montados diagramas de Markov para representação gráfica do sistema e em seguida as matrizes de transição para resolução matemática do problema via simulação.

O modelo consiste na representação das seqüências de estados e suas propriedades temporais. São transições dentro do sistema correspondente à seqüências de falhas e reparos, principais dados de entrada para montagem da matriz de transição do modelo. Os estados representam as condições do sistema em um determinado instante, que podem ser operacional, degradado ou falho.

A malha de CI será dividida em subsistemas que, por sua vez, são divididos em componentes, de acordo a sua configuração física. Os subsistemas são modelados por diagramas de estado, os quais representam, graficamente, os estados dos componentes do sistema e as transições entre estados. A determinação da probabilidade do sistema estar disponível será realizada a partir das distribuições de probabilidades dos subsistemas.

A malha CI é um sistema complexo, constituídos de vários componentes dispostos em série formando subsistemas que, por sua vez, podem estar combinados em paralelo, visando atender a requisitos de redundância. A malha será representada por um diagrama de blocos de confiabilidade o qual é desdobrado em sub-níveis, conforme representado no estudo de caso do próximo capítulo.

Como exemplo, analisaremos um modelo esquemático de um dispositivo da malha chamado cabo elétrico, com apenas 02 estados, operacional (0) e falho (1), onde todo processo para calcular a disponibilidade deste sistema será demonstrado a seguir. A figura 3.07 ilustra o diagrama de Markov representando as transições deste sistema:

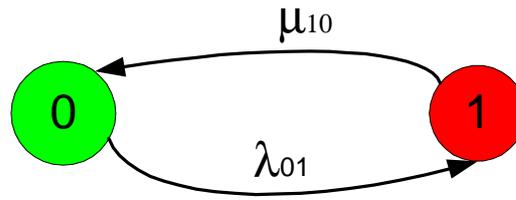


Figura 3.07 – Diagrama de Markov modelo esquemático

As taxas de transições ou velocidade de transição, $\lambda_{i \rightarrow j}$, onde i representa o estado de origem e j o estado destino, e os estados do sistema, estão descritos nas tabelas abaixo:

Tabela 3.04 – Estados do modelo esquemático

Estado	Descrição do Estado	Condição do Sistema
0	Sistema Normal	Operação Normal
1	Cabo elétrico falho	Indisponível

Tabela 3.05 – Taxas de transição do modelo esquemático

Transição	Descrição	Expressão
$\lambda_{0 \rightarrow 1}$	Taxa de Falha do cabo elétrico	λ_{CE}
$\mu_{1 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do cabo elétrico	μ_{CE}

De acordo com a metodologia abordada na seção 3.4.2 deste capítulo, e com base nos dados das tabelas acima, pode-se montar as equações de estado e a matriz de transição para análise da disponibilidade deste sub-sistema:

Matriz de transição:

$$\begin{Bmatrix} \lambda_{00} & \lambda_{10} \\ \lambda_{01} & \lambda_{11} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\lambda_{01} & \mu_{10} \\ \lambda_{01} & -\mu_{10} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{Bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} P[X(t)=0] \\ P[X(t)=1] \end{Bmatrix} \quad [01]$$

Para resolução do sistema de equação escrito acima, utiliza-se a transformada de Laplace (Spiegel, 1971), para simplificar o sistema de equações diferenciais a um conjunto de equações algébricas.

A transformada de Laplace da probabilidade de estado $P_j(t)$ é indicada por

$P_j^*(s)$, sendo a transformada de Laplace da derivada temporal de $P_j(t)$ é dada por:

$$L(P_j(t)) = s P_j(s) - P_j(0)$$

voltando a equação de estado [01] tem-se:

$$\begin{Bmatrix} -\lambda_{01} & \mu_{10} \\ \lambda_{01} & -\mu_{10} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{Bmatrix} \quad [02]$$

Considera-se que o sistema encontra-se inicialmente no estado 0, isto é, $P_0(0)=1$ e $P_j(0)=0$ para todo $j \neq i$. Utilizando a transformada de Laplace para resolução do sistema de equações de uma solução transiente, chega-se a seguinte matriz de transição:

$$\begin{Bmatrix} -\lambda_{01} & \mu_{10} \\ \lambda_{01} & -\mu_{10} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} sP_0(s) \\ sP_1(s) - 1 \end{Bmatrix} \quad [03]$$

Posteriormente o processo inverso é realizado, ou seja, para determinação das probabilidades de estado $P_j(t)$, são determinadas a partir da transformada inversa de Laplace.

As equações de estado extraídas da matriz de transição acima estão escritas a seguir:

$$\text{sendo, } P_0(s) = \frac{1}{s} - P_1(s) \quad [04]$$

Substituindo a equação [04] na equação [03] tem-se:

$$P_1(s) = \frac{1}{\lambda + \mu + s} + \frac{\lambda}{s} \cdot \frac{1}{\lambda + \mu + s} \quad [05]$$

Através da transformada inversa de Laplace chega-se a equação [06] a seguir:

$$P_1(s) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{1}{\lambda + \mu + s} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{s}$$

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad [06]$$

Sendo $P_0(t) = 1 - P_1(t)$ tem-se:

$$P_0(t) = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad [07]$$

Montadas as equações de estado, os dados referentes às taxas de falha e reparo serão introduzidos na equação para resolução do sistema. Para este componente como para os demais da malha de CI, por se tratar de uma tecnologia em fase de desenvolvimento, dados operacionais que representem significativamente estas taxas não estão disponíveis. Os dados disponíveis são oriundos de bancos de dados de confiabilidade, dados operacionais de um campo de petróleo piloto e dados providos de opinião de especialistas.

Então, para a aquisição de taxas de transição mais significativas, que representem melhor a realidade da malha, os dados disponíveis serão tratados através da Metodologia Bayesiana. A análise Bayesiana fornecerá o valor atualizado das taxas de transição que serão empregados no modelo Markoviano.

Devido à diversas causas como fatores ambientais, diferenças de projeto e variações operacionais, os componentes ou sistemas, em sub-populações diferentes, exibem características de confiabilidade diferentes, ou seja, a taxa de falha ou reparo ser inerentemente diferente para uma sub-população quando comparadas com outras. Os subsistemas da malha de CI serão avaliados, como uma população não homogênea, por ter diferentes modos de falha, taxas de falhas, e tempos de reparo.

Conforme apresentado na seção 3.4.2, a distribuição *a priori*, o estado de conhecimento atual, será construída com a análise Bayesiana de variabilidade populacional (*Two States Bayes*), esta análise tem a capacidade de unir e agregar os valores para obter-se uma melhor avaliação do sistema. A distribuição *a priori* da taxa de falha será a média da distribuição Lognormal da taxa de falha (λ) e um desvio padrão (σ) especificado pelo fator de erro (EF) da média da Lognormal. No estudo de caso bem como no exemplo aqui tratado foi utilizada uma distribuição *a priori* para taxa de falha de $\lambda = 1.0e - 6$ com fator de erro (EF=10).

Para iniciar-se a análise de variabilidade populacional do parâmetro de interesse (taxas de transição), precisa-se especificar qual a distribuição de probabilidade que melhor descreve a variabilidade populacional, como também a construção da verossimilhança. A função de verossimilhança será construída de acordo com o tipo de evidência, isto é, baseada em dados como o número de falhas e/ou em conhecimento de especialistas e dados provenientes de banco de dados genéricos.

De acordo com as diferentes fontes de evidência, a verossimilhança será uma mistura de funções para melhor representar a evidência disponível. Cada dado tem uma função verossimilhança que melhor o representaria, mas conforme explanado na seção 3.5.8, utilizaremos uma mistura de distribuições para construção da verossimilhança, sendo qualquer dado disponível uma valiosa informação.

Com base nos dados disponíveis, pode-se construir as seguintes funções de verossimilhanças:

- Distribuição Poisson onde dados operacionais estejam disponíveis;
- Distribuição Lognormal onde dados de opinião de especialista e/ou banco de dados genéricos estejam disponíveis.

Com o objetivo de avaliar a variabilidade populacional da taxa de falha do componente cabo elétrico, será assumido que a variabilidade da taxa de falha será de acordo com a distribuição Lognormal, podendo ser representada por:

- modelo Lognormal-Poisson-Lognormal;
- o caso especial Lognormal-Lognormal;
- o caso especial Lognormal-Poisson.

A distribuição *a posteriori* da população de variabilidade paramétrica, baseada na distribuição *a priori* e na verossimilhança construída, será encontrada com a aplicação do teorema de Bayes.

Voltando ao problema esquemático, abaixo apresenta-se na tabela 3.06 os dados observados taxas de falha conforme fontes de aquisição:

Tabela 3.06 – Dados de Falha do Sistema

Componente	Taxa de Transição	Coefficiente de Incerteza (EF)	Fonte
Cabo Elétrico	4.46828E-3	10	SINTEF
Cabo Elétrico	2.28E-5	5	Especialista

Devido a não disponibilidade de dados referentes a tempo de reparo para este componente, a taxa de reparo foi especificada através de especialistas com valor $\mu = 0,0001$, porém caso existissem valores de tempo de reparo observados durante a operação da malha, iriam ser tratados através da metodologia Bayesiana da mesma forma da taxa de falha. Diferenciando-se a função de verossimilhança empregada, Poisson, e a distribuição *a posteriori* da população de variabilidade paramétrica seria a mesma Lognormal-Poisson-Lognormal.

Para determinação da taxa de falha, serão inseridos no teorema de Bayes os seguintes valores da distribuição *a priori* e da verossimilhança:

- A distribuição *a priori* $\lambda = 1.0e - 6$ com EF=10;
- A verossimilhança será construída através do caso especial Lognormal-Lognormal, explanada anteriormente na seção 3.5.8.

Inserindo-se os dados disponíveis na equação [07] abaixo e após resolução da equação, encontra-se a taxa de falha média estimada para o componente de $\lambda = 4.39e - 5$.

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln \mu_i - \ln v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{\sigma_i \tau \sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \quad [07]$$

Inserindo-se os valores das taxa de falha $\lambda = 4.39e - 5$ e taxa de reparo $\mu = 0,0001$ nas equações [05] e [06], chega-se a: $P_0(t) = 0,39$ e $P_1(t) = 0,61$.

Então da disponibilidade que este equipamento esteja disponível no final da missão é de aproximadamente 40%.

No capítulo seguinte, será apresentado um estudo de caso de duas configurações de CI, uma modelagem e simulação prática aplicando a metodologia Bayesiana e os Processos Markovianos acima apresentados.

4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA MALHA DE CI

Neste capítulo, a disponibilidade de duas configurações distintas de malhas de CI será estimada e analisada através da metodologia híbrida de processos Markovianos e inferência Bayesiana. Os resultados de cada malha serão analisados para cada configuração, como também será realizada uma comparação entre as malhas, com a finalidade de obter informações de qual delas é a mais vantajosa em termos de disponibilidade.

A apresentação do modelo será realizada primeiramente com a definição do cenário da malha, caracterização das configurações dos sistemas e apresentação dos diagramas de transição. Posteriormente, serão fornecidas informações sobre o simulador utilizado para processamento dos cálculos das metodologias adotadas e a aplicação de ferramentas matemáticas para aquisição das métricas de confiabilidade, e em seguida, algumas condições e definições sobre a metodologia utilizada na viabilização prática realizada, bem como os resultados obtidos a partir da simulação.

4.1 Aplicação da Metodologia ao problema em estudo

A aplicação da metodologia Bayesiana no estudo da disponibilidade de malhas de CI tem a finalidade de usar o conhecimento do especialista aliado a dados operacionais e a dados providos de banco de dados (OREDA, 2002), para a obtenção de estimativas de taxas de transição (taxas de falhas e reparo).

Estimativas das taxas de transição do Processo Markoviano serão obtidas sob condições de elevada incerteza por se tratar de uma nova tecnologia ainda em desenvolvimento. A utilização de Métodos de estatística clássica para obtenção destas taxas não é indicada a estas condições por conduzir a intervalos de confiança extremamente longos. A Metodologia Bayesiana será utilizada devido à flexibilidade de tratar dados providos de diversas fontes de informação.

Devido à utilização de várias fontes de dados referentes a uma mesma métrica de confiabilidade, por serem dados provenientes de equipamentos semelhantes operados e mantidos de forma distinta, são tratados como populações não homogêneas e serão modelados através de uma mistura de distribuições.

Face aos tipos de evidência disponíveis, dados operacionais, estimativas de taxas de falha oriundas de banco de dados genéricos de confiabilidade e opinião do especialista, a variabilidade populacional será modelada por uma distribuição Lognormal, quando se dispor de dados de opinião de especialista e banco de dados, por uma distribuição Poisson, quando se dispor de dados operacionais e por uma Lognormal-Poisson-Lognormal, quando se dispor de dados oriundos das três fontes. A Lognormal-Poisson-Lognormal será utilizada também por comumente modelar processos com base no tempo, assumindo que os eventos de interesse estão aleatoriamente e igualmente dispersados no tempo, e por tratar dados oriundos de opinião de especialistas através da teoria multiplicativa de erro de Mosleh (1983).

Considera-se neste trabalho que os componentes das malhas de CI, após a falha, serão reparados e voltarão à operação. Também será considerado como reparo a substituição de um componente da malha. Dentre os modelos disponíveis para análise de sistemas reparáveis, onde o tempo de reparo não seja desprezível, o Processo de Markov foi utilizado neste trabalho devido à flexibilidade de modelar tempos de reparo separadamente dos tempos de falha, por melhor se adequar ao tratamento de sistemas redundantes e, principalmente, por melhor tratar configurações como o cenário da malha escolhido, onde o sistema possui estados de operação em que um componente pode se encontrar degradado, mas estará em operação.

Uma das desvantagens dos modelos Markovianos é o fenômeno conhecido como explosão de estados. Trata-se do crescimento pontencialmente exponencial do número de estados à medida que cresce o tamanho e complexidade do sistema. Para minimizar o impacto da explosão de estados, utiliza-se uma técnica para redução do número total de estados do sistema, de forma a combinar estados similares do sistema. Ou seja, os componentes em paralelo, considerados idênticos, são agrupados como melhor representado através da próxima Figura 4.01:

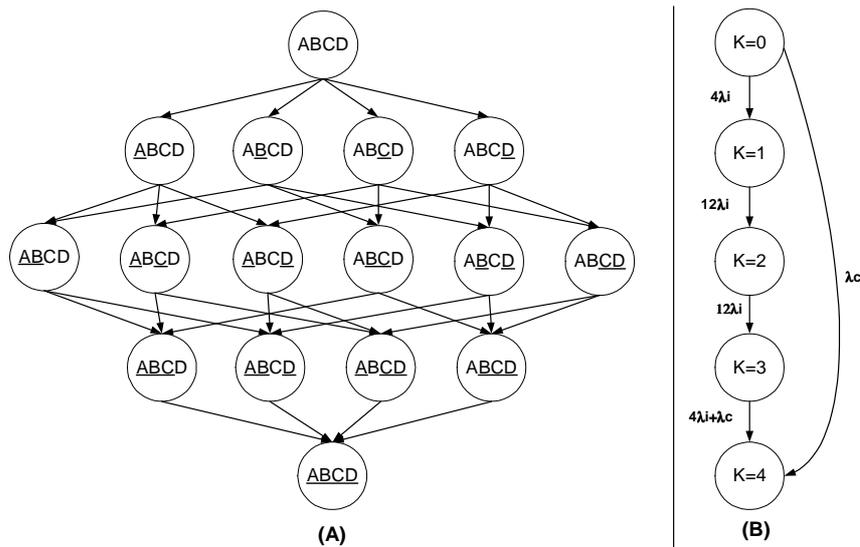


Figura 4.01 – Técnica de Contorno da Explosão de Estados Combinação de Estados Similares

4.1.1 Tratamento da degradação de sistemas

A deterioração dos componentes do sistema será analisada através do Processo de Markov com a utilização de Missões de Múltiplas Fases. Será utilizada a flexibilidade fornecida por Markov no tratamento de múltiplos estados de um mesmo subsistema, identificando-se os subsistemas mais prováveis na contribuição da indisponibilidade do sistema.

O Método consiste na aplicação de coeficientes de degradação em períodos determinados, chamados fases. As taxas de transição são constantes dentro de cada fase. Os estados do sistema não serão modificados de fase para fase, apenas as taxas ao passar de uma fase para outra poderão aumentar, diminuir ou serem nulas, de acordo com características de cada sistema.

O tempo de missão do sistema, período estimado para análise da confiabilidade do sistema, bem como os percentuais de degradação por fase, foram informações adquiridas a partir de especialistas, representados na Figura 4.02 a seguir. O tempo de missão a ser utilizado na modelagem do sistema será de 5 anos, compreendidos nas fase 1 (de 0 a 1 ano), fase 2 (de 1 a 3 anos) com 20% de degradação, e fase 3 (de 3 a 5 anos) com 20% de degradação durante o período;

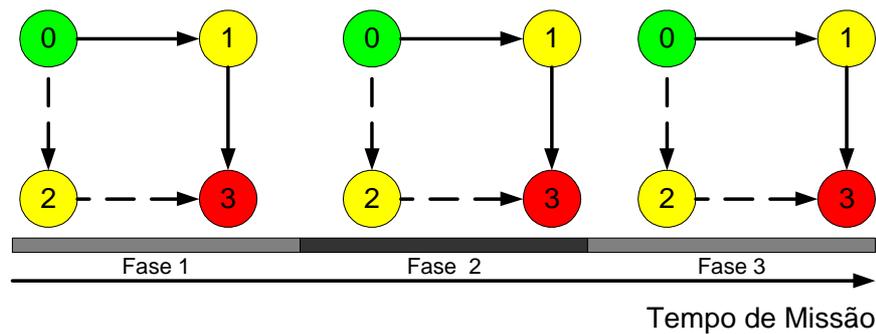


Figura 4.02 – Degradação das Malhas de CI

A utilização de Missões de Múltiplas Fases será aplicada com o objetivo de fornecer estimativas de degradação dos componentes da malha. Outras metodologias e processos como testes de degradação, tratada por Mattos (2002), e análises de sobrevivência (Lee, 1980) poderiam ser aplicadas, porém, dentro do contexto Markoviano, esta metodologia será aplicada por melhor se adequar às características do sistema.

4.1.2 Condições sobre a modelagem

O objetivo desta modelagem está na avaliação da probabilidade de ocorrência de falhas do sistema de CI, isto é, a falha de um ou mais subsistemas que venham a proporcionar a indisponibilidade da malha.

Considera-se que:

- i Na ocorrência de falhas nos componentes da CI a malha ficará indisponível, devendo haver intervenção no poço para realização do reparo;
- ii Devem estar em operação durante o tempo de missão considerado:
 - todas as zonas de produção/injeção de uma malha;
 - as funções de atuação e monitoração de cada componente;

iii Todos os componentes da malha são passíveis de reparo. Contudo, em subsistemas de superfície é sempre possível completar as atividades de manutenção antes da degradação posterior da malha;

iv A modelagem da degradação é introduzida no Modelo Markoviano via missões de múltiplas fases, onde as taxas foram consideradas constantes para cada fase;

v As duas malhas de CI apresentam duas zonas de produção/injeção em série, portanto, a falha de uma das zonas é suficiente para a ocorrência de uma falha crítica.

Os estados do sistema serão divididos em dois grupos, os estados disponíveis e os estados indisponíveis. Pode-se considerar que a disponibilidade da malha de CI é a probabilidade de o sistema não deixar o subconjunto Disponível (D).

A seguir, as propriedades específicas de cada estado da malha de CI, dentro do contexto Markoviano:

- Estado Inicial ou estado 0 (zero): a capacidade do sistema é 100% da capacidade nominal. O sistema de CI está operando sem falhas. Integra o grupo de estados disponíveis, representado pelo número **zero** na cor **Verde** no diagrama de Markov;
- Degradado (D): o sistema apresenta alguma falha, porém esta não comprometerá criticamente a operação do mesmo. Subsistemas/componentes que se encontram neste estado podem levar o sistema à falha total, por não estar trabalhando nas perfeitas condições de operação, com exceção dos subsistemas situados na superfície, que são passíveis de manutenção. Estes estados são representado na cor **Amarela** no diagrama de Markov e fazem parte do grupo de estados disponíveis;
- Indisponível (I): o sistema CI encontra-se falho, isto é, ocorreram uma ou mais falhas que ocasionaram à falha da malha. Fazem parte do grupo de estados indisponíveis e só voltarão a operação após reparo do componente/subsistema. Estes estados são representado na cor **Vermelha** no diagrama de Markov.

4.2 Caracterização e modelagem das malhas de CI

Os cenários apresentados a seguir são malhas de configurações diferentes, que se encontram em fase de análise quanto à disponibilidade. A escolha de implantação/instalação será realizada tomando-se como base, inclusive, o nível de disponibilidade das configurações existentes.

4.2.1 Configuração da malha A

O sistema de completção inteligente consiste de válvulas remotamente operadas totalmente elétricas, com abertura variável e sensores eletrônicos de temperatura, pressão e vazão (baseado em venturi e sensor diferencial de pressão). Uma das principais vantagens do sistema é a utilização de apenas um cabo para os elementos de atuação e de monitoração. Isso simplifica emendas, penetradores, passagens por packers, conector ANM/Tubing Hanger e umbilical.

Uma malha típica de CI consiste em um sistema de duas zonas de produção, cujos equipamentos podem ser montados como apresentado abaixo:

- SCS (Surface Control System) – unidade de supervisão e controle do sistema de completção inteligente;
- WIU (Well Interface Unit) – controlador e unidade de alimentação das ferramentas.
- Linha de Produção;
- Umbilical elétrico – cabo de interligação entre a plataforma e o poço;
- Árvore de Natal e Conectores Wet Mateable elétrico (Umbilical-ANM) e (ANM-Tubing Hanger);
- Cabo Elétrico – alimentação para os elementos de atuação e de monitoração;
- Packer de produção 1;
- FMU1 (Flow Measurement Unit) – unidade de medição da pressão do anular, da coluna e da vazão da zona superior. Consiste em um venturi interligado a dois sensores que monitoram temperatura e pressão em série;

- IPR1 (Intelligent Production Regulator) – válvula de controle infinitesimal de fluxo da zona superior. Consiste em uma válvula Elétrica e dois Sensores em paralelo que monitoram temperatura e pressão;
- Sistema de Drenagem/Injeção 1;
- Packer de isolamento – isolamento entre as zonas de interesse superior e inferior;
- Packer de produção – isolamento da zona de interesse;
- FMU2 (Flow Measurement Unit) – unidade de medição da pressão do anular, da coluna e da vazão da zona superior. Consiste em um venturi interligado a dois sensores que monitoram temperatura e pressão em série;
- IPR2 (Intelligent Production Regulator) – válvula de controle infinitesimal de fluxo da zona superior. Consiste em uma válvula Elétrica e dois Sensores em paralelo que monitoram temperatura e pressão;
- Sistema de Drenagem/Injeção 2;
- Coluna;
- Workover de Reservatório– intervenção realizada para manutenção do sistema devido a razões relacionadas ao reservatório.

4.2.2 Tratamento da configuração da malha A

O sistema é dividido em subsistemas que, por sua vez, são divididos em componentes de acordo com a estrutura física da malha. Trata-se de um sistema complexo, constituídos por vários componentes dispostos, conforme pode-se observar na Figura 4.03, que ilustra o diagrama de blocos de confiabilidade, caracterizado por uma combinação de subsistemas em série e em paralelo:

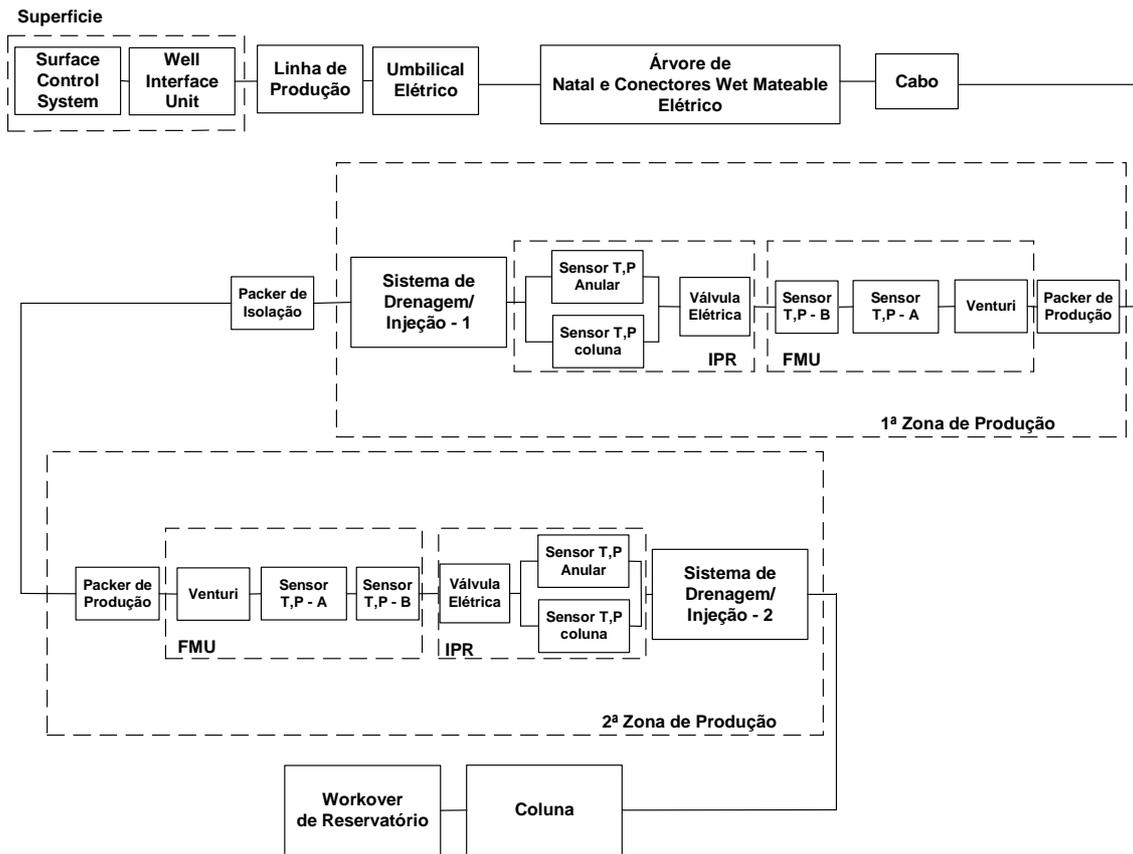


Figura 4.03 – Diagrama de Blocos da Malha A

A modelagem da malha A está representada através do diagrama de Markov da Figura 4.04. Na figura, o estado 0', representado na cor azul, não corresponde a um estado real do sistema, mas sim a uma representação de um estado de transferência para melhorar o entendimento e o aspecto visual da malha modelada. As linhas pontilhadas, ligando um estado a outro representam a ocorrência de falhas de causa comum, discutidas anteriormente no item 3.1.5. Todos os estados apresentados abaixo estão detalhados na Tabela 4.01, que fornece a condição em que o sistema se encontra em cada estado.

O modelo de Markov da malha A possui ao todo $r=25$ estados $S=\{0,1,\dots,24\}$, estando disponíveis no subconjunto $D=\{0,1,2,9,11,17,19,21\}$, que se encontram em operação normal ou degradada, e indisponíveis os estados $I=\{3,4,5,6,7,8,10,12,13,14,15,16,18,20,22,23,24\}$ estados em que a malha está falha, porém admite reparo durante o tempo de missão considerado. Além destas informações, algumas observações são pertinentes:

- estados 11 (Sistema de Drenagem/Injeção degradado) e 12 (Sistema de Drenagem/Injeção falho): a degradação corresponde à perda de eficiência, mas continua-se a operação desde que esteja acima do limite mínimo aceitável (especificado por técnicos da área de CI);
- estados 21 (Coluna degradada) e 22 (Coluna falha): a degradação da coluna corresponde ao rompimento com área dentro do limite aceitável; após este limite máximo ocorre a falha da coluna;
- o componente árvore de natal pode apresentar dois modos de falha: falha Intrínseca do componente ou falha por formação de Hidrato; ambas taxas agrupadas ao (estado 4), em conjunto com as taxas dos conectores Wet Mateable Elétrico Umbilical-ANM e ANM-Tubing Hanger;
- a linha de produção também possui 3 modos de falha: falha Intrínseca do componente, falha por formação de Hidrato ou falha por formação de Parafina, taxas agrupadas ao (estado 24),
- a coluna de produção possui 4 modos de falha: falha Intrínseca do componente, falha por Entupimento, falha por *Tubing Hanger* ou falha por formação de Furo, toas as taxas agrupadas no (estado 22);
- as falhas em *Workover* de Reservatório podem ocorrer por Isolação de Zona de Produção ou por Acidificação/Fratura , taxas agrupadas no (estado23);

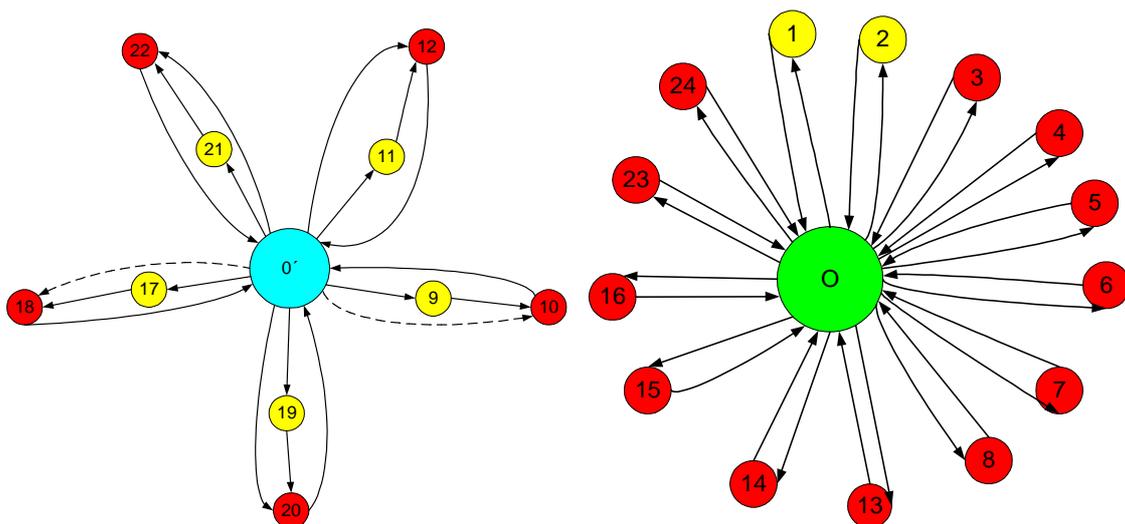


Figura 4.04 – Diagrama de Markov da Malha A

Através do diagrama de Markov, apresentado na Figura 4.04, nota-se que a malha está em operação no estado inicial representado pelo estado 0 (zero), onde se inicia o tempo de missão do sistema. Opera em modo degradado quando nos estados 1 (Surface Control System falho e em manutenção), 2 (Well Interface Unit falho e em manutenção), 9 (Um dos Sensores T,P zona 1 falho), 11 (Sistema Drenagem/Injeção zona 1 em operação degradada), 17 (Um dos Sensores T,P zona 2 falho), 19 (Sistema Drenagem/Injeção zona 2 em operação degradada), 21 (Coluna em operação degradada). Nos demais estados, a malha estará falha, só retornando à operação normal após parada para reparo do componente.

Tabela 4.01 – Estados da Malha A

Estado	Descrição do Estado	Condição do Sistema
0	Sistema Normal	Operação Normal
1	Surface Control System falho e em manutenção	Degradado
2	Well Interface Unit falho e em manutenção	Degradado
3	Umbilical Elétrico falho	Indisponível
4	Árvore de Natal falha : Intrínseca + Formação de Hidrato Conectores Wet Mateable Elétrico	Indisponível
5	Cabo Elétrico Falho	Indisponível
6	Packer de Produção zona 1 falho	Indisponível
7	FMU zona 1 falha (Venturi + 2 Sensores T,P)	Indisponível
8	Válvula elétrica zona 1 (atuação indevida) falha	Indisponível
9	Um dos Sensores T,P zona 1 falho	Degradado
10	Ambos Sensores T,P zona 1 falho	Indisponível
11	Sistema Drenagem/Injeção Z-1 degradado (Eficiência>Limite)	Degradado
12	Sistema Drenagem/Injeção Z-1 falho (Eficiência<Limite)	Indisponível
13	Packer de Isolação entre zonas falho	Indisponível
14	Packer de Produção da zona 2 falho	Indisponível
15	FMU zona 2 falha (Venturi + 2 Sensores T,P)	Indisponível
16	Válvula elétrica zona 2 (atuação indevida) falha	Indisponível
17	Um dos Sensores T,P zona 2 falho	Degradado
18	Ambos Sensores T,P zona 2 falho	Indisponível
19	Sistema Drenagem/Injeção zona 2 degradado (Eficiência>Limite)	Degradado
20	Sistema Drenagem/Injeção Z- 2 falho (Eficiência<Limite)	Indisponível
21	Coluna degradada: Rompimento (área) < Limite	Degradado
22	Coluna falha: Rompimento (área) > Limite : Intrinseca	Indisponível
23	Ocorrência de Wokover de Reservatório : Isolação de Zona de Produção + Acidificação/Fratura	Indisponível
24	Linha de Produção falha Intrínseca + Formação de Hidrato e Parafina	Indisponível

As transições entre estados do sistema, representadas pelo diagrama de Markov da Figura 4.03, estão descritas na Tabela 4.02 a seguir, onde deve-se considerar que:

- os equipamentos de superfície, devido à localização e à maior facilidade de executar reparos, assim que falharem serão reparados, sem ocorrência significativa de indisponibilidade do poço;
- os sensores que monitoram temperatura e pressão, localizados IPR, dois Sensores em paralelo, um na posição coluna e o outro na posição anular de cada zona, são considerados idênticos, possuindo a mesma taxa de falha;
- estando os sensores IPR em paralelo e sendo estes idênticos, a confiabilidade em cada zona é modelada utilizando o processo de combinação de estados similares, conforme explicados na seção 4.1;
- a falha simultânea dos sensores T,P em paralelo é considerada como falha de causa comum. Este tipo de falha dependente será modelada de acordo com o modelo do Fator β , apresentado na seção 3.2.2, onde considerou-se $\beta = 0,1$ de acordo com conhecimento de especialistas em confiabilidade de sistemas, representando a proporção de falhas de causa comum sobre falhas independentes do componente: por exemplo, $\lambda_{TP-CCF-1}$ é a taxa de falha de causa comum dos sensores T,P da zona 1, que equivale a $\lambda_{TP-CCF-1} = 0,10 \cdot \lambda_{TP-I-1}$;

Tabela 4.02 – Taxas de Transição do Modelo de Markov da Malha A

Transição	Descrição	Expressão
$\lambda_{0 \rightarrow 1}$	Taxa de Falha da Surface Control System	λ_{SCS}
$\mu_{1 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Surface Control System	μ_{SCS}
$\lambda_{0 \rightarrow 2}$	Taxa de Falha da Well Interface Unit	λ_{WIU}
$\mu_{2 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Well Interface Unit	μ_{WIU}
$\lambda_{0 \rightarrow 3}$	Taxa de Falha do Umbilical Elétrico	λ_{UE}
$\mu_{3 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Umbilical Elétrico	μ_{UE}
$\lambda_{0 \rightarrow 4}$	Taxa de Falha da Árvore de Natal	λ_{ANM}
$\mu_{4 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Árvore de Natal	μ_{ANM}
$\lambda_{0 \rightarrow 5}$	Taxa de Falha do Cabo Elétrico	λ_{CE}

$\mu_5 \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do Cabo Elétrico	μ_{CE}
$\lambda_{0 \rightarrow 6}$	Taxa de Falha do Packer de Produção zona 1	λ_{PP-1}
$\mu_6 \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do Packer de Produção zona 1	μ_{PP-1}
$\lambda_{0 \rightarrow 7}$	Taxa de Falha do FMU zona 1	λ_{FMU-1}
$\mu_7 \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do FMU zona 1	μ_{FMU-1}
$\lambda_{0 \rightarrow 8}$	Taxa de Falha da Válvula elétrica zona 1	λ_{VELE-1}
$\mu_8 \rightarrow 0$	Taxa de Reparo da Válvula elétrica zona 1	μ_{VELE-1}
$\lambda_{0 \rightarrow 9}$	Taxa de Falha de um dos Sensores T,P da Z-1	$2\lambda_{TP-I-1}$
$\mu_9 \rightarrow 10$	Taxa de Falha de ambos os Sensores T,P Z-1	$\lambda_{TP-I-1} + \lambda_{TP-CCF-1}$
$\lambda_{0 \rightarrow 10}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Ambos os Sensores T,P Z-1	$\lambda_{TP-CCF-1}$
$\mu_{10} \rightarrow 0$	Taxa de Reparo de ambos os Sensores T,P Z-1	$\mu_{TP-CCF-1}$
$\lambda_{0 \rightarrow 11}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem/Injeção Z-1 Degradado	$\lambda_{DRE1-DEG}$
$\lambda_{11 \rightarrow 12}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-1	$\lambda_{DRE1-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 12}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-1 crítica	$\lambda_{DRE1-CRI}$
$\mu_{12} \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do Sistema de Drenagem-Injeção Z-1 crítica	$\mu_{DRE1-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 13}$	Taxa de Falha do Packer de Isolação entre zonas	λ_{PI}
$\mu_{13} \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do Packer de Isolação entre zonas	μ_{PI}
$\lambda_{0 \rightarrow 14}$	Taxa de Falha do Packer de Produção zona 2	λ_{PP-2}
$\mu_{14} \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do Packer de Produção zona 2	μ_{PP-2}
$\lambda_{0 \rightarrow 15}$	Taxa de Falha do FMU zona 1	λ_{FMU-1}
$\mu_{15} \rightarrow 0$	Taxa de Reparo do FMU zona 2	μ_{FMU-2}
$\lambda_{0 \rightarrow 16}$	Taxa de Falha da Válvula elétrica zona 2	λ_{VELE-2}

$\mu_{16 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Válvula elétrica zona 2	μ_{VELE-2}
$\lambda_{0 \rightarrow 17}$	Taxa de Falha de um dos Sensores T,P da Z-2	$2\lambda_{TP-I-2}$
$\lambda_{17 \rightarrow 18}$	Taxa de Falha de ambos os Sensores T,P Z-2	$\lambda_{TP-I-2+}$ $\lambda_{TP-CCF-2}$
$\lambda_{0 \rightarrow 18}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Ambos os Sensores T,P Z-2	$\lambda_{TP-CCF-2}$
$\mu_{18 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo de ambos os Sensores T,P Z-2	$\mu_{TP-CCF-2}$
$\lambda_{0 \rightarrow 19}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-2 degradado	$\lambda_{DRE2-DEG}$
$\lambda_{19 \rightarrow 20}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-2	$\lambda_{DRE2-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 20}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-2	$\lambda_{DRE2-CRI}$
$\mu_{20 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Sistema de Drenagem-Injeção Z-2 crítica	$\mu_{DRE2-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 21}$	Taxa de Falha da Coluna Degradada	$\lambda_{COL-DEG}$
$\lambda_{21 \rightarrow 22}$	Taxa de Falha da Coluna Crítica	$\lambda_{COL-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 22}$	Taxa de Falha da Coluna Crítica	$\lambda_{COL-CRI}$
$\mu_{22 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Coluna Crítica	$\mu_{COL-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 23}$	Taxa de Falha Ocorrência de Workover do reservatório	$\lambda_{WR-ISOL}$
$\mu_{23 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Ocorrência de Workover do reservatório	$\mu_{WR-ISOL}$
$\lambda_{0 \rightarrow 24}$	Taxa de Falha da Linha de Produção	λ_{LP-I}
$\mu_{24 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Linha de Produção	μ_{LP-I}

A seguir, a metodologia adotada para aquisição das taxas de transição do modelo Markoviano. Apresenta-se o Simulador Redat-plus baseado na Metodologia Bayesiana para o tratamentos dos dados disponíveis.

4.2.3 Simulador utilizado para análise das malhas – Redat plus

Os simulador Redat plus (Prediction technologies, 2003), foi desenvolvido pelo Professor Enrique Droguett em colaboração com a Universidade de Maryland, e será utilizado na obtenção da distribuição *a posteriori* das taxas de transição (taxa de falha e reparo). Este simulador foi desenvolvido a partir da Metodologia Bayesiana e será utilizado no tratamento de dados escassos, oriundos de diversas fontes e com elevado grau de incerteza. A escolha por tal programa se deve ao fato da existência de trabalhos desenvolvidos com esta ferramenta e por serem adequados para o tratamento dos dados disponíveis, fazendo uma conexão entre Metodologias de Bayes e Markov.

Os dados de entrada para o simulador (taxas de transição), foram inseridos para cada componente da malha. Primeiro, implantados os dados de taxas de falha, obtido através do banco de dados de confiabilidade (OREDA,2002), dados obtidos do SINTEF através de Borg (2001) e de opiniões de especialistas da área de CI, apresentados na Tabela 4.03 a seguir. Depois foram introduzidos os dados disponíveis das taxas de reparo, adquiridos através de dados operacionais de um caso típico de CI e de opinião de especialistas, apresentados na Tabela 4.04 a seguir. Para cada valor apresentado nesta tabela foi realizado uma análise de sensibilidade, isto é, para cada valor foi acrescentado uma determinada variação nas taxas de falha e reparo e testado sua representatividade nos resultados fornecidos através da modelagem. Após diversas variações nas taxas de transição, chegou-se a conclusão que a variação destes dados não influenciavam positivamente no modelo.

Por serem dados escassos e obtidos de diferentes fontes, coeficientes de incerteza, como percebidos pelo analista, foram aplicados no tratamento da opinião do especialista e de dados obtidos de banco de dados genéricos. Conforme Mosleh (1983), o coeficiente de incerteza trata-se da relação de um percentil superior ao valor mediano de uma quantidade incerta, distribuída de acordo com uma distribuição lognormal. Geralmente, utiliza-se o percentil 95th como valor superior, então o valor do fator de variação (EF) significa:

$$EF = \frac{X_{95}}{X_{50}}$$

onde X_{50} é mediana e X_{95} é o valor percentis.

Quanto maior o EF, maior o grau de incerteza da taxa. Quanto menor o EF, maior confiança se tem na qualidade das informações adquiridas. Os coeficientes de incerteza utilizados, foram baseados em questionamentos diretos, no futuro pretende-se utilizar métodos como o DELPHI ou procedimentos de educação, como os desenvolvidos por Campello de Souza (2002).

Tabela 4.03 – Dados de Falha do Sistema

Componente	Taxa de Transição	Coefficiente de Incerteza (EF)	Fonte
Árvore de Natal	2.22059E-6	7	OREDA
Árvore de Natal	2.28E-5	5	Especialista
Umbilical	8.785E-8	7	OREDA
Umbilical	2.28E-5	5	Especialista
Linha de Produção	4.646E-8	7	OREDA
Linha de Produção	2.28E-5	5	Especialista
Cabo Elétrico	4.46828E-3	10	SINTEF
Cabo Elétrico	2.28E-5	5	Especialista
Packer	2.94031E-3	10	SINTEF
Packer	2.28E-5	5	Especialista
Sensor T,P	9.21E-8	7	OREDA
Sensor T,P	1.164E-4	5	Especialista
Sensor T,P	5.040E-3	5	Especialista
Coluna	1.79E-8	7	OREDA
Coluna	2.28E-5	5	Especialista

Para os componentes que não foram relatados na Tabela 4.03 acima, só uma estimativa de falha foi utilizada na modelagem ($\lambda = 1e-6$), oriunda da equipe de desenvolvimento das malhas de CI aqui analisadas.

Tabela 4.04 – Dados de Reparo do Sistema

Componente	Nº de Falhas	Tempo de reparo (dias)	Motivo
Árvore de Natal	1	5	Reparo
Árvore de Natal	1	18	Hidrato
Árvore de Natal	1	9	Hidrato
Árvore de Natal	1	5	Reparo
Árvore de Natal	1	77	Reparo
Árvore de Natal	1	25	Hidrato
Árvore de Natal	1	24	Reparo
Árvore de Natal	1	18	Hidrato
Árvore de Natal	1	39	Hidrato
Árvore de Natal	1	18	Hidrato
Árvore de Natal	1	24	Hidrato
Árvore de Natal	1	10	Hidrato
Árvore de Natal	1	14	Reparo
Árvore de Natal	1	8	Hidrato
Árvore de Natal	1	10	Hidrato
Árvore de Natal	1	14	Reparo
Árvore de Natal	1	9	Reparo
Linha de Produção	1	19	Furo
Linha de Produção	1	7	Furo + Hidrato
Linha de Produção	1	16	Linhas Danificadas
Linha de Produção	1	6	Parafina
Linha de Produção	1	22	Furo + Hidrato
Linha de Produção	1	10	Parafina
Linha de Produção	1	25	Hidrato
Linha de Produção	1	39	Hidrato
Linha de Produção	1	19	Hidrato
Linha de Produção	1	18	Hidrato
Linha de Produção	1	20	Parafina
Linha de Produção	1	8	Parafina

Linha de Produção	1	10	Parafina
Linha de Produção	1	12	Parafina
Linha de Produção	1	2	Parafina
Linha de Produção	1	4	Parafina
Linha de Produção	1	8	Parafina
Linha de Produção	1	12	Parafina
Workover de Reservatório	1	33	Isolamento
Workover de Reservatório	1	110	Fratura
Workover de Reservatório	1	127	Fratura
Sistema Drenagem/Injeção	1	116	Substituição
Sistema Drenagem/Injeção	1	88	Substituição
Sistema Drenagem/Injeção	1	218	Substituição
Umbilical	1	14	Hidrato
Coluna	1	25	Vazamento
Coluna	1	17	Reparo

Para os componentes que não foram relatados na Tabela 4.04 acima, apenas uma estimativa de reparo foi utilizada na modelagem ($\mu = 0.001$), oriunda da equipe de desenvolvimento das malhas de CI aqui analisadas.

Com os dados de taxas de falhas dos subsistemas e componentes existentes na malha e duração das atividades de reparo constantes nas Tabelas 4.03 e 4.04, as taxas de transição de cada subsistema será então estimada a partir das diversas fontes de dados disponíveis via inferência Bayesiana.

Os dados inseridos no simulador serão calculados através da equação [10] abaixo e demonstrada anteriormente na seção 3.5.8.

$$P_i = \frac{e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln \mu_i - \ln \nu)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_i\tau t_i} \sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int_{\lambda} Ga(\lambda / K_i + 1, t_i) \cdot LN \left(\lambda \frac{\frac{\nu}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\tau^2}}, \sqrt{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}} \right) d\lambda$$

Para o melhor entendimento, um exemplo da aquisição da taxa de falha de um dos componentes da malha (Umbilical Elétrico), será apresentada a seguir com base nos seguintes dados:

- estimativa da Taxa de falha obtida através do OREDA : $\lambda = 8.785E-8$, com fator de incerteza (EF=7.0)
- estimativa da Taxa de falha através de opinião do especialista: $\lambda = 1E-6$, com fator de incerteza (EF=5.0);

O caso especial, a distribuição lognormal-lognormal demonstrado anteriormente na seção 3.5.8, foi utilizada por melhor representar os dados disponíveis sobre as taxas de falha de componentes, dados oriundos de opinião de especialistas (Mosleh,1983) e bancos de dados genéricos.

Ao término da simulação, os resultados são mostrados através de gráficos e tabelas que fornecem a variabilidade populacional da taxa de falha, representados a seguir nas Figuras 4.05, 4.06, 4.07 e Tabela 4.05. Após análise dos dados e resolução da equação, a Figura 4.05 a seguir apresenta a distribuição *a posteriori* dos parâmetros de variabilidade populacional dos dados analisados das taxas de falha. Esta Figura apenas ilustra, em terceira dimensão, um exemplo de um componente da malha.

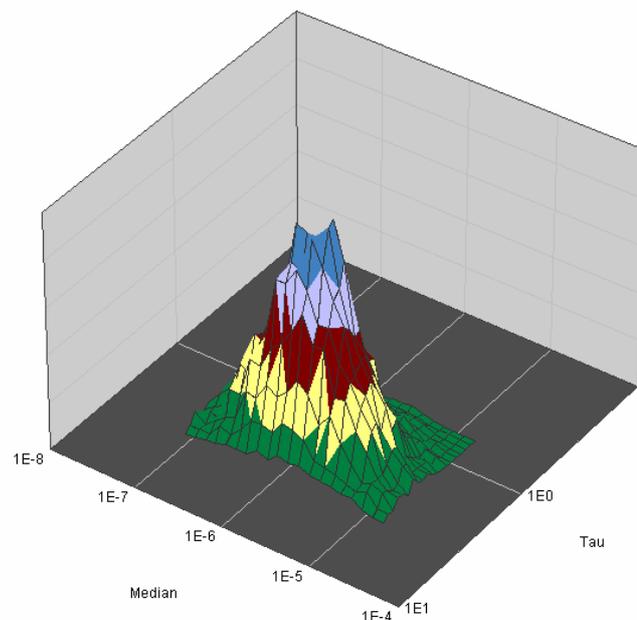


Figura 4.05 – Distribuição *a posteriori* Conjugada dos parâmetros da variabilidade populacional

Outro resultado fornecido pelo simulador está apresentado na Figura 4.06 abaixo, que representa a mediana marginal da variabilidade populacional da taxa de falha. Trata-se da distribuição de densidade da variabilidade populacional baseada na combinação dos dados.

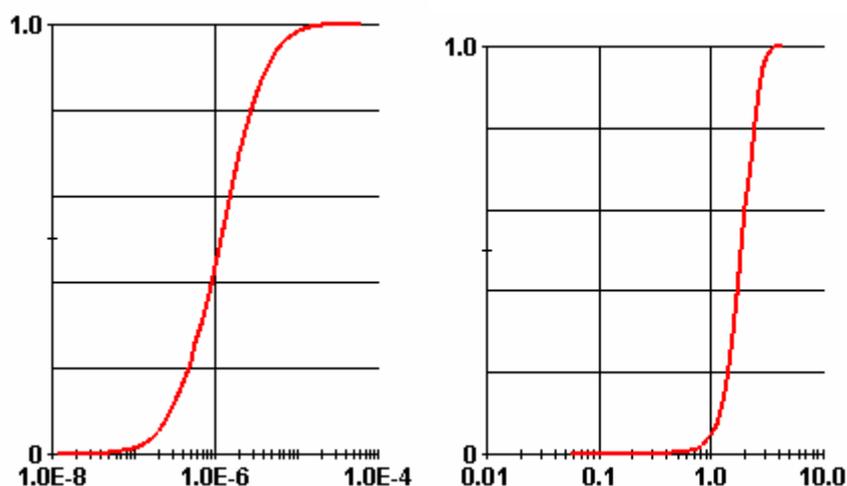


Figura 4.06 –Parâmetros de Variabilidade populacional

A Tabela 4.05 a seguir, apresenta os dados gerados pelo simulador referentes aos percentis e mediana da taxa de falha. Através da análise dos gráficos e dados gerados pelo simulador foi definida qual taxa melhor representa cada componente ou subsistema da malha.

Tabela 4.05 – Estatísticas dos Percentis e Mediana da Taxa de Falha

	Moda	Inferior	Mediana	Superior
Mediana	4,418E-04			
Variância	2,805E10			
1st	2,648E-9	1,624E-7	9,017E-9	3,459E-10
5th	2,302E-8	4,686E-7	4,168E-8	2,853E-9
10th	6,537E-8	8,4E-7	9,373E-8	8,567E-9
50th	1,71E-6	9,872E-6	1,642E-6	2,816E-7
90th	3,968E-5	2,557E-4	2,833E-5	4,452E-6
95th	1,066E-4	7,353E-4	6,36E-5	8,601E-6
99th	8,304E-4	5,548E-3	2,902E-4	2,719E-5

A Figura 4.07 abaixo, é a representação da distribuição densidade probabilidade da variabilidade populacional esperada da taxa de falha.

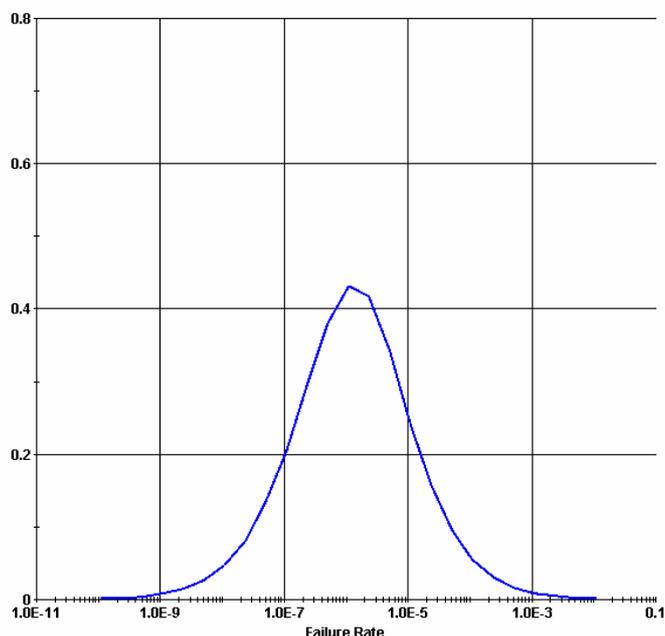


Figura 4.07 – Gráfico exemplo da FDP em Função do Tempo de Falha

Ao analisar as informações expostas nas Figuras e Tabela acima, utilizou-se a mediana da variabilidade populacional *a posteriori* para representar a melhor estimativa da taxa de falha a ser utilizada no processo de Markov da malha de CI.

Após modelagem e simulação das taxas de transição dos demais componentes da malha, as Tabelas 4.06 e 4.07 mostram as taxas de falha e reparo, respectivamente, adquiridas através do tratamento com a Metodologia Bayesiana:

Tabela 4.06 – Dados de Falha do Sistema adquiridas por Bayes

Componente	Taxas de Falha (horas)
Árvore de Natal	5.69E-6
Umbilical	1.44E-6
Linha de Produção	1.10E-6
Cabo Elétrico	4.39E-5
Packer	4.19E-5
Sensor T,P	3.26E-6
Coluna	7.95E-7

Tabela 4.07 – Dados de Reparo do Sistema adquiridas por Bayes

Componente	Motivo	Taxas de Reparo (horas)
Árvore de Natal	Reparo	2.31E-3
Árvore de Natal	Hidrato	1.67E-3
Linha de Produção	Hidrato	1.49E-3
Linha de Produção	Parafina	3.45E-3
Wokover de Reservatório	Isolamento	7.21E-4
Wokover de Reservatório	Fratura	3.85E-4
Umbilical	Hidrato	2.70E-3
Coluna	Reparo	2.16E-3
Sistema Drenagem/Injeção	Substituição	3.33E-4

4.2.4 Simulação da Malha A

Após aquisição dos dados de entrada, taxas de falha e reparo dos subsistemas existentes obtidas através da metodologia Bayesiana apresentadas nas Tabelas 4.03 e 4.04, e da definição dos fatores de causa comum e estados de degradação dos subsistemas da malha, apresentados na Tabela 4.01 e 4.02, parte-se para os cálculos das métricas de confiabilidade do sistema.

A matriz de transição do modelo Markoviano é construída com a utilização do simulador Markov, desenvolvido pelo Professor Enrique Droguett com base na Metodologia Markoviana. Este simulador auxiliará na resolução da matriz de transição, explanada anteriormente na seção 3.3.2. e fornecerá as métricas de confiabilidade necessárias para avaliação da disponibilidade do sistema.

A escolha pela utilização deste simulador se deve ao fato da existência de trabalhos já desenvolvidos com esta ferramenta e por ter a flexibilidade de tratar sistemas com múltiplos estados de um mesmo subsistema, possibilitando a inclusão de missões de múltiplas fases na avaliação da degradação.

Com base nas taxas de transição descritas na Tabela 4.02, constrói-se a matriz de transição para malha A representada a seguir:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \vdots \\ P[X(t) = 24] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{0-0} & \mu_{24-0} \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_{0-24} & \lambda_{24-24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \vdots \\ P[X(t) = 24] \end{bmatrix}$$

O comportamento dinâmico do sistema será determinado através da solução das equações de estado da malha, isto é, da resolução do sistema de equações diferenciais apresentadas na seção 3.3.2., realizados com o auxílio do simulador Markoviano. A variação da probabilidade do sistema ocupar cada um dos possíveis estados ao longo do tempo de missão especificado, como as demais métricas de confiabilidade, será obtida para análise do comportamento do sistema.

Concluída a simulação, os resultados obtidos das métricas de confiabilidade do sistema estão apresentados na Tabela 4.08 abaixo, bem como uma representação gráfica para melhor visualização da disponibilidade da malha, nas Figuras 4.08, 4.09, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 a seguir:

Tabela 4.08 - Métricas de Confiabilidade da Malha A

Métrica de Confiabilidade	Resultado obtido
Tempo operacional Total Esperado	2.07E+04
Tempo Falho Total Esperado	2.32E+04
Taxa de Falha Instantânea ao Final da Missão	1.08E-4
Indisponibilidade Média	5.28E-1
Indisponibilidade Instantânea ao Final da Missão	4.92E-1

Após avaliação da Tabela 4.08 acima tem-se os seguintes resultados:

- a indisponibilidade instantânea do sistema no final do tempo de missão é de 49,2%; têm-se portanto 50,8% de chances da malha A ao final do tempo de missão se encontrar disponível;

- a indisponibilidade média da malha A durante o tempo de missão é de 52,8%;
- a taxa de falha da malha A ao final da missão é de 0,000108 falha/hora, ou seja, aproximadamente uma falha a cada dez mil horas de operação.

O tempo de missão foi dividido em três fases, sendo a primeira fase com duração de um ano, a segunda fase com duração de dois anos, e por ultimo a terceira fase também com duração de dois anos. As taxas de falha da segunda e a terceira fase foram inseridas nos cálculo com um adicional de 20% de degradação nos componentes, segundo especialista de CI, conforme processo de múltiplas fases descrito anteriormente na seção 4.1.1..

Através da Figura 4.08 apresentada seguir, pode-se observar que a probabilidade de falha cresce rapidamente nas primeiras horas de operação do sistema. Observa-se que a probabilidade da ocorrência de falhas é maior devido à problemas de natureza técnica, causa de falha comum ou por falhas relativas a defeitos de fabricação. Porém esta fase inicial tem curto período de duração.

A partir da segunda fase observa-se um aumento na probabilidade de falha. Este comportamento se deve à mudança das taxas de falha que representam a degradação do sistema. Através da gráfico pode-se observar que a malha terá maior probabilidade de falha durante a esta fase, dentro do tempo de missão definido. Em seguida inicia-se uma diminuição da probabilidade, que se deve ao fato da ocorrência de falhas em apenas alguns componentes da malha. Outro fato que influencia no aumento e posterior redução da probabilidade de falha, é que o sistema passará por alguns ciclos de reparo, pois trata-se de um processo irreduzível (não possui estados absorventes).

Na terceira fase acrescentou-se mais 20% de degradação aos componentes e observou-se um comportamento similar ao estágio anterior, mas a partir deste período os componentes da malha estarão com os mesmos valores de taxa de falha até o final do tempo de missão. Como não há estados absorventes e sendo esta a ultima fase considerada, o sistema tende ao estado estacionário com o acumulo do tempo.

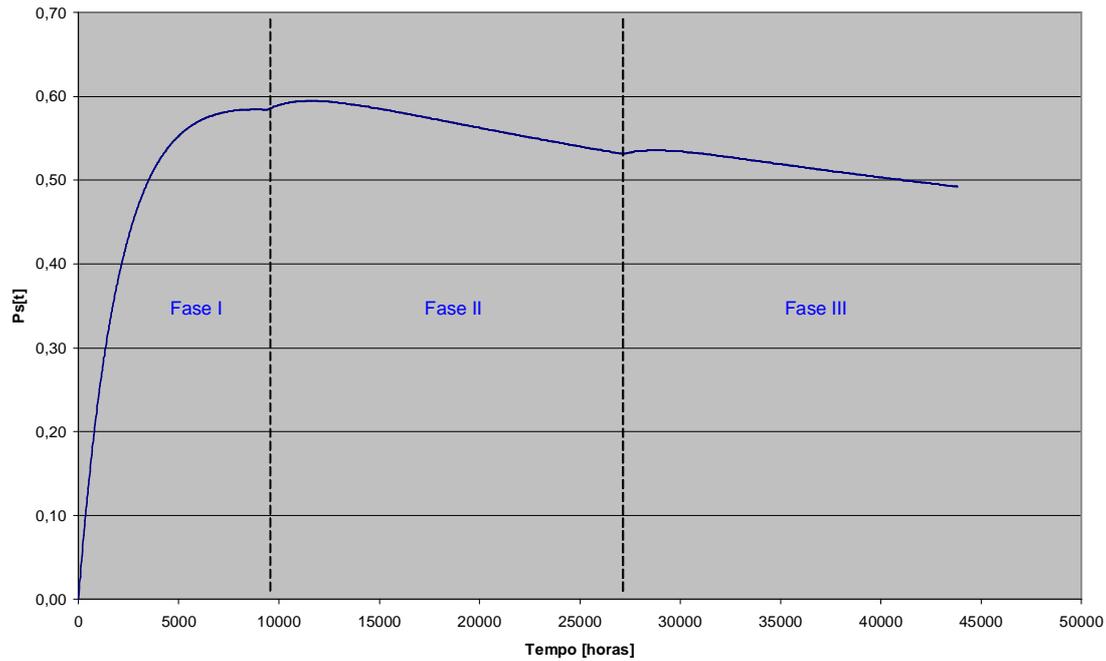


Figura 4.08 – Probabilidade de Falhas da Malha A

Quanto a disponibilidade do sistema, apresentada na Figura 4.09 que se segue, pode-se observar que a probabilidade da malha se encontrar disponível no final do tempo de missão é acima de 50%.

Similarmente ao gráfico anterior, nas primeiras horas de operação do sistema há uma queda da disponibilidade do sistema. Após um ano de operação a disponibilidade da malha aumenta devido a efetivação de ciclos de reparo após a ocorrência de falhas em alguns componentes da malha.

No início da segunda fase o sistema apresenta um pequena redução da disponibilidade, devido ao aumento da degradação ao sistema, mas no decorrer deste período a malha terá maior probabilidade de se encontrar disponível. A terceira fase tem comportamento também similar à segunda fase inicialmente, posteriormente tendendo ao estado estacionário.

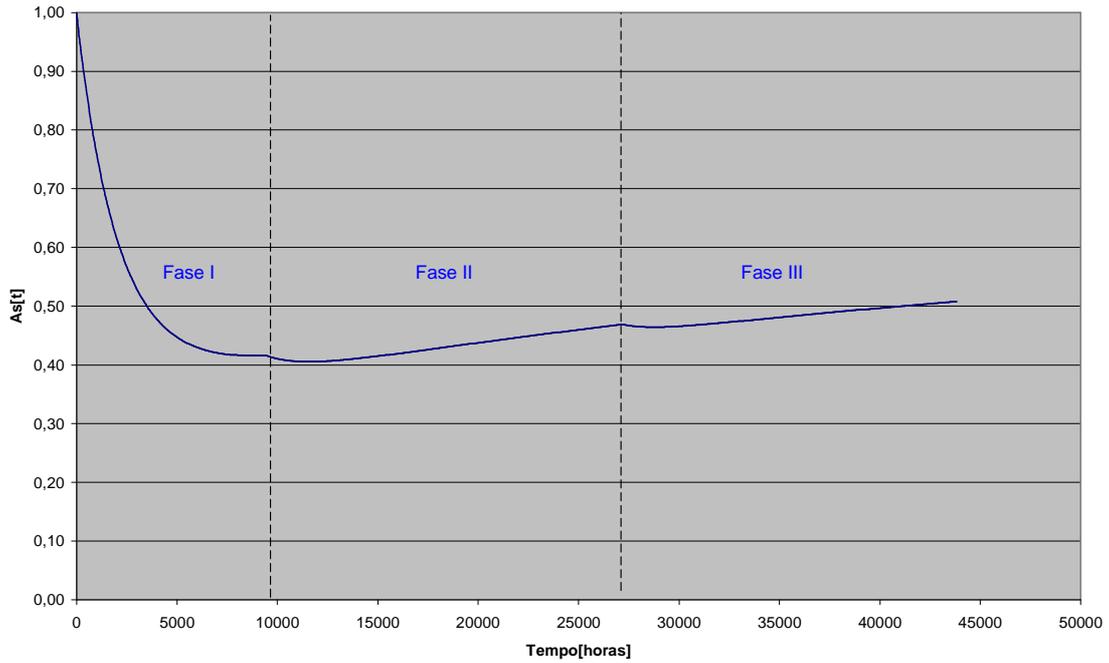


Figura 4.09 – Disponibilidade da Malha A

Nas Figuras 4.10 e 4.11 a seguir, estão representadas respectivamente o número de falha e reparo do sistema durante o tempo de missão observado. Através dos gráficos chega-se ao número de aproximadamente três falhas ocorridas e três reparos efetivados.

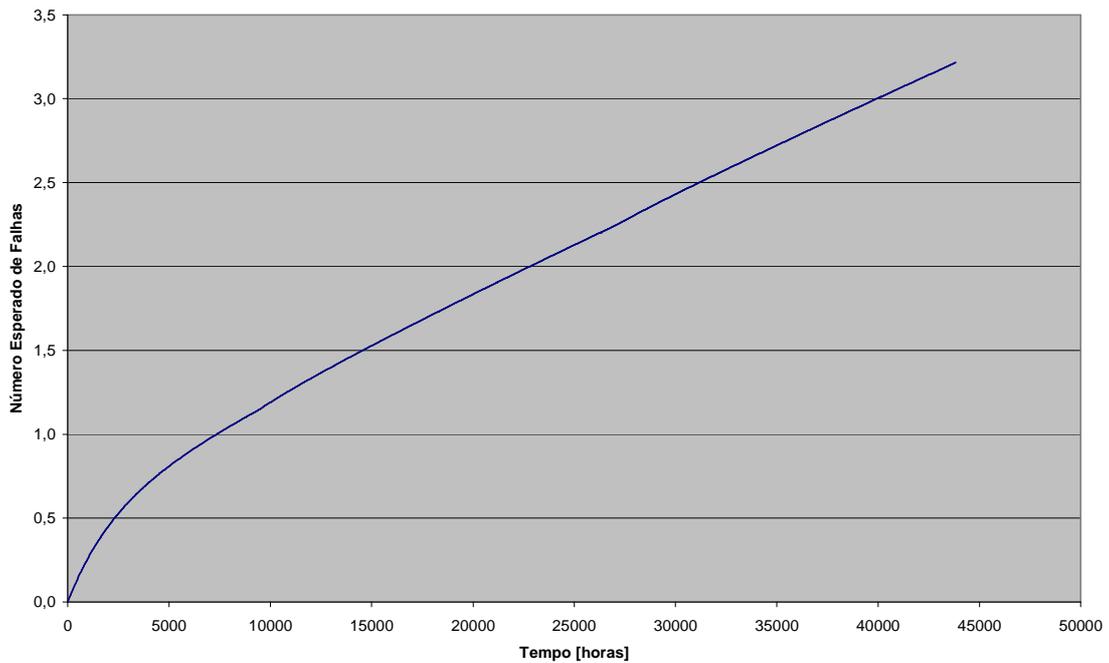


Figura 4 10 – Número de Falhas da Malha A

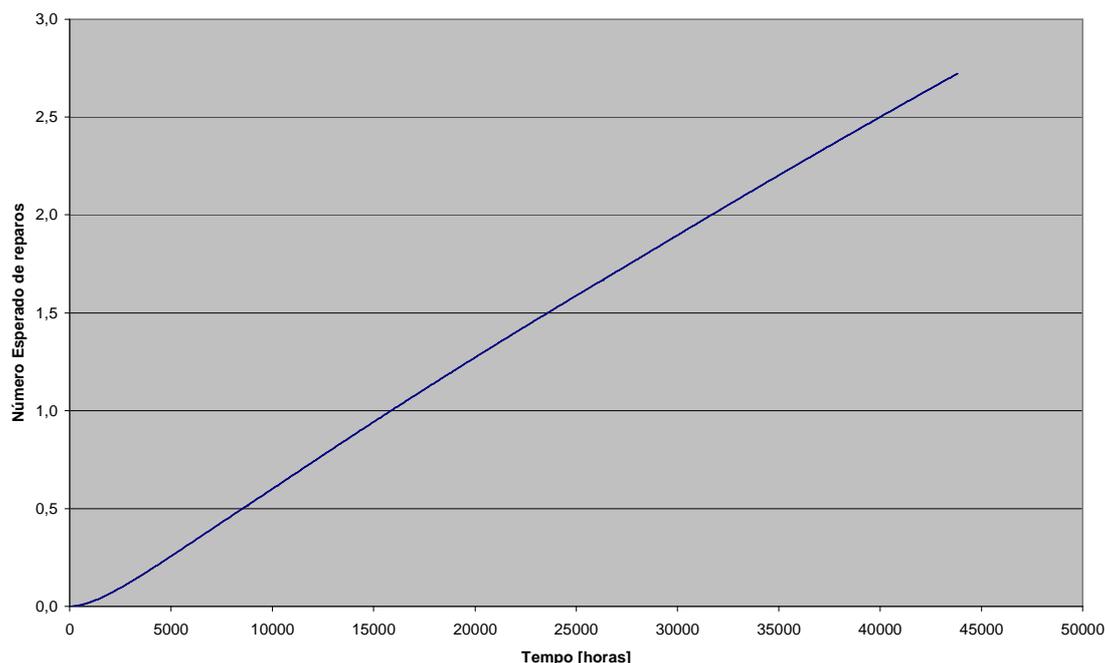


Figura 4 11 – Número de Reparos da Malha A

Neste caso em que se analisa um sistema complexo, para melhor estudar a contribuição de cada subsistema na disponibilidade da malha, foram formados grupos de componentes e/ou modos de falha de um componente.

Estes grupos representam subsistemas que influenciam de forma diferenciada no comportamento da malha. As probabilidades de falha de cada componente serão analisadas a seguir individualmente para aqueles que mais se destacaram durante a análise dos resultados obtidos após simulação.

Pode-se observar através das Figuras 4.12 e 4.13 que os subsistemas Umbilical e Coluna cujas taxas de falha, determinadas pela metodologia Bayesiana e fornecidas como entrada no simulador Markoviano, foram da ordem de 0,000001falha/hora, intervêm no sistema de forma especial e fornecem maior disponibilidade à malha. São componentes que possuem uma elevada probabilidade de falha no início da operação do sistema mas, posteriormente reduzem consideravelmente a probabilidade de falha.

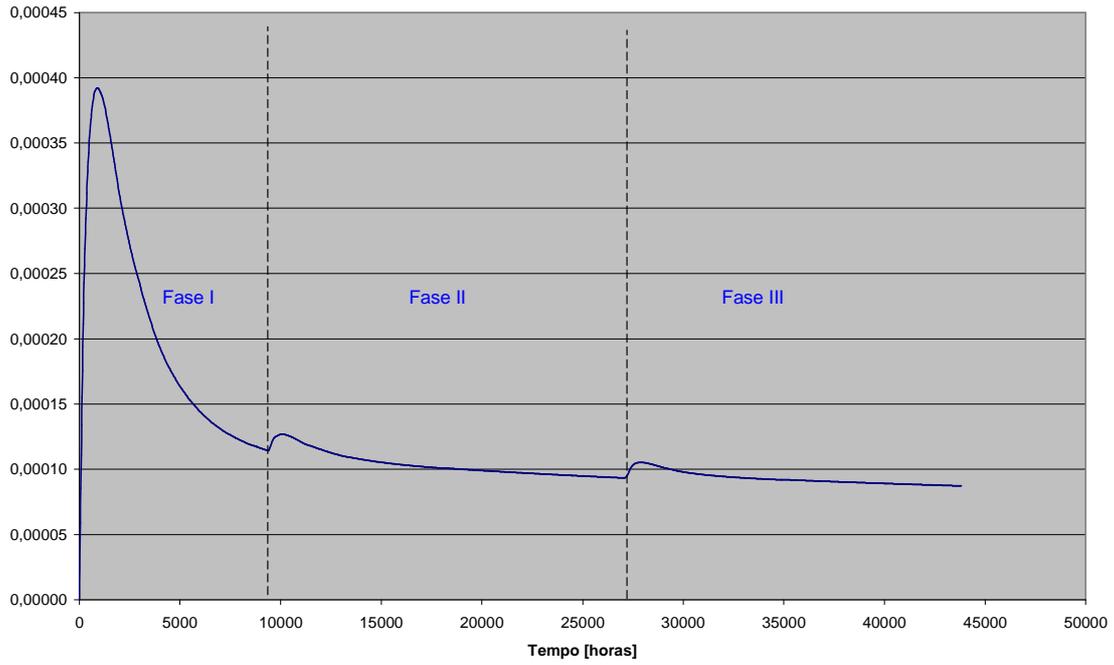


Figura 4.12– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (Umbilical)

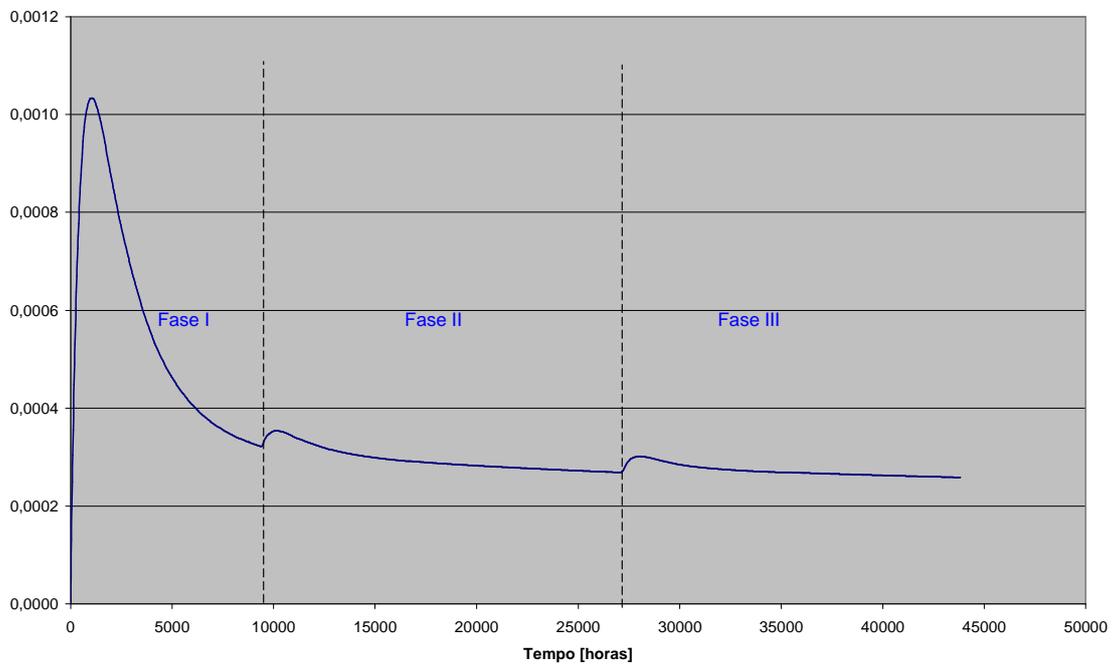


Figura 4.13 – Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (Coluna)

Em contrapartida os subsistemas que fazem parte da Completção Inteligente, o IPR (*Intelligent Production Regulator*) que consiste em uma válvula Elétrica e dois Sensores em paralelo que monitoram temperatura e pressão e FMU1 (*Flow Measurement Unit*) que consiste em um venturi interligado a dois sensores que monitoram temperatura e pressão em série, ambos com taxas de falha da ordem de 0,00001falha/hora, possuem uma maior probabilidade de tornar o sistema indisponível.

O grupo ANM que consiste de uma junção entre a Árvore de Natal e Conectores Wet Mateable elétrico (Umbilical-ANM) e (ANM-Tubing Hanger), por estar agrupados à componentes da CI também revelou desempenho similar ao IPR e FMU, gerando uma maior probabilidade de tornar a malha indisponível durante o tempo de missão definido.

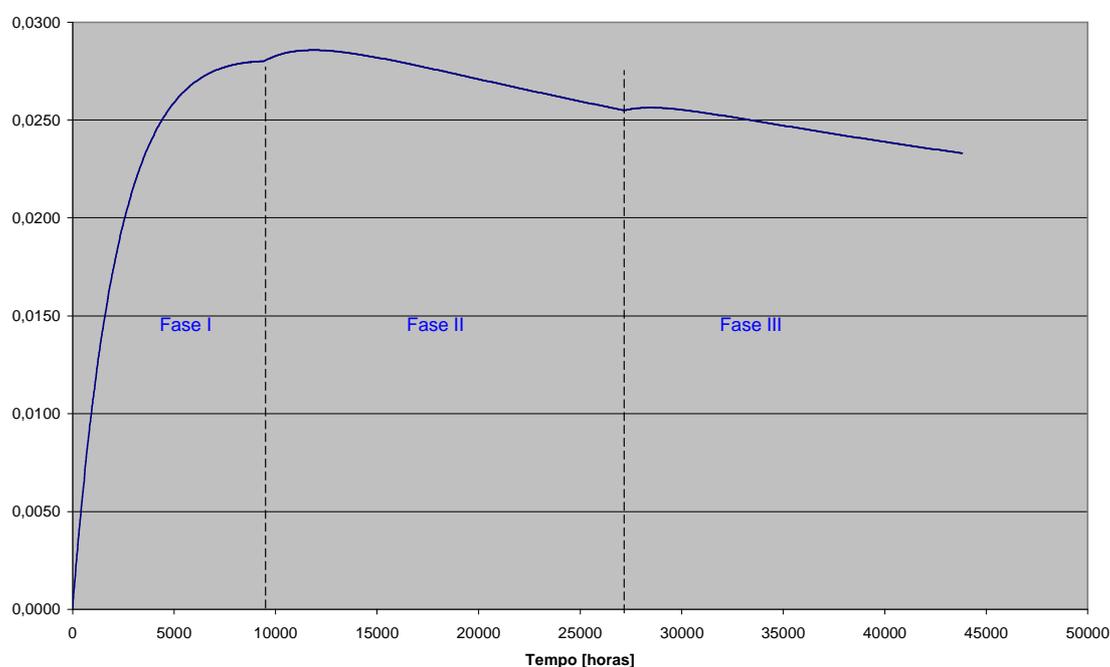


Figura 4.14– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (ANM)

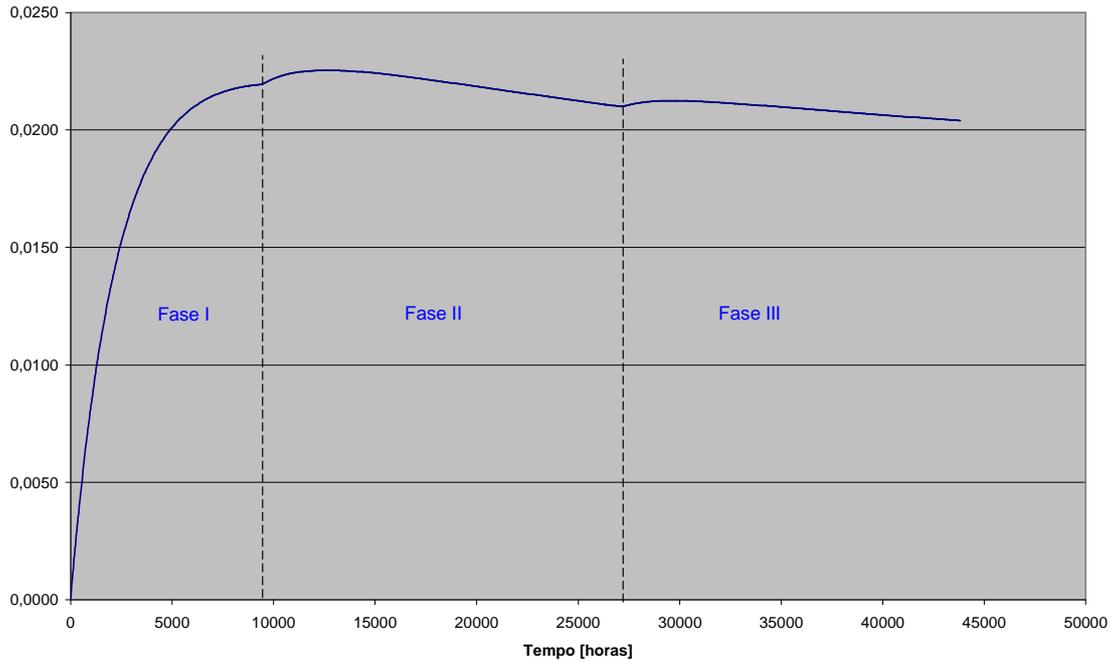


Figura 4.15– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (IPR – Válvula Elétrica e sensores Temperatura e Pressão)

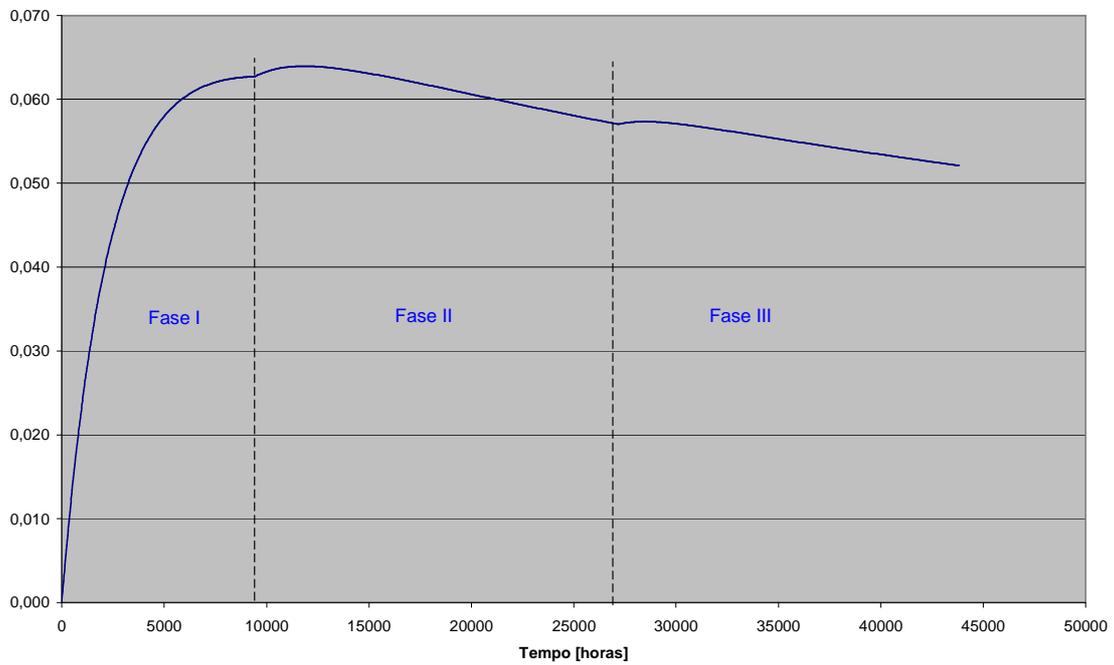


Figura 4.16– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha A (FMU)

Em resumo, constata-se através dos gráficos apresentados através das Figuras 4.10 à 4.16 que a configuração da malha A, durante o tempo de missão definido, apresenta a probabilidade de se encontrar disponível em metade deste período. Parte-se, então, para a análise da configuração B, onde acrescenta-se mais redundância ao sistema.

4.2.6 Configuração da Malha B

O sistema de completção inteligente denominado malha B é similar à malha A, porém com maior quantidade de equipamentos redundantes, como podemos analisar graficamente no diagrama de blocos da Figura 4.13. Esta configuração possui mais um cabo elétrico em paralelo. São duas FMU (Flow Measurement Unit) em paralelo, sendo estas construídas por um venturi conectado à dois sensores em série, na IPR (Intelligent Production Regulator) mais dois sensores T,P foram adicionados em paralelo aos demais. Esta malha também contém duas zonas de produção montadas como apresentado a seguir:

- SCS (Surface Control System) – unidade de supervisão e controle do sistema de completção inteligente;
- WIU (Well Interface Unit) – controlador e unidade de alimentação das ferramentas.
- Linha de Produção;
- Umbilical elétrico – cabo de interligação entre a plataforma e o poço;
- Árvore de Natal e Conectores Wet Mateable elétrico (Umbilical-ANM) e (ANM-Tubing Hanger);
- Cabos Elétricos – alimentação para os elementos de atuação e de monitoração;
- Packer de produção 1;
- FMU1 (Flow Measurement Unit) – unidade de medição da pressão do anular, da coluna e da vazão da zona superior. Consiste em um venturi interligado a quatro sensores, sendo dois sensores que monitoram temperatura e pressão em paralelo interligados a mais dois em série;

- IPR1 (Intelligent Production Regulator) – válvula de controle infinitesimal de fluxo da zona superior. Consiste em uma válvula Elétrica e quatro Sensores em paralelo que monitoram temperatura e pressão;
- Sistema de Drenagem/Injeção 1;
- Packer de isolamento – isolamento entre as zonas de interesse superior e inferior;
- Packer de produção – isolamento da zona de interesse;
- FMU2 (Flow Measurement Unit) – unidade de medição da pressão do anular, da coluna e da vazão da zona superior. Consiste em um venturi interligado a quatro sensores, sendo dois sensores que monitoram temperatura e pressão em paralelo interligados a mais dois em série;
- IPR2 (Intelligent Production Regulator) – válvula de controle infinitesimal de fluxo da zona superior. Consiste em uma válvula Elétrica e quatro Sensores em paralelo que monitoram temperatura e pressão;
- Sistema de Drenagem/Injeção 2;
- Coluna;
- Workover de Reservatório– intervenção realizada para manutenção do sistema devido a razões relacionadas ao reservatório.

4.2.7 Tratamento da configuração da malha B

Sendo a maior quantidade de componentes redundantes a principal diferença entre as malhas, a estrutura física da malha B está representada a seguir no diagrama de blocos de confiabilidade na Figura 4.17 a seguir:

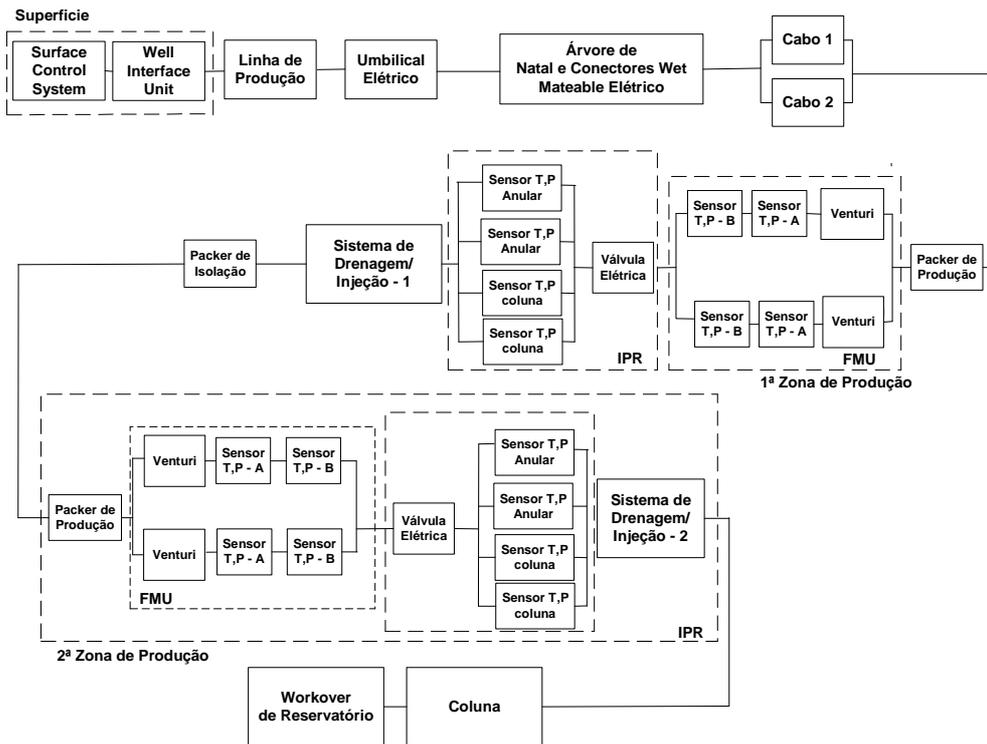


Figura 4.17 – Diagrama de Blocos da Malha B

A modelagem da malha B está representada através dos diagramas de Markov da Figura 4.18. As mesmas considerações efetuadas para a configuração A, apresentadas na Tabela 4.09, serão aplicadas à configuração B, com exceção do fato que o modelo de Markov da malha B possui ao todo $r=32$ estados $S=\{0,1,\dots,31\}$, estando disponíveis no subconjunto $D=\{0,1,2,5,8,11,12,13,15,19,22,23,24,26,28\}$ que se encontram em operação normal ou degradada, e indisponíveis os estados $I=\{3,4,6,7,9,10,14,16,17,18,20,21,25,27,29,30,31\}$ estados em que a malha está falha, porém admite reparo durante o tempo de missão considerado.

Além destas informações, algumas observações são pertinentes:

- estados 15 (Sistema de Drenagem/Injeção degradado) e 16 (Sistema de Drenagem/Injeção falho): a degradação corresponde à perda de eficiência, mas continua-se a operação desde que esteja acima do limite mínimo aceitável (especificado por técnicos da área de CI);
- estados 28 (Coluna degradada) e 29 (Coluna falha): a degradação da coluna corresponde ao rompimento com área dentro do limite aceitável; após este limite máximo ocorre a falha da coluna;

- o componente árvore de natal pode apresentar dois modos de falha: falha Intrínseca do componente ou falha por formação de Hidrato; ambas taxas agrupadas ao (estado 4), em conjunto com as taxas dos conectores Wet Mateable Elétrico Umbilical-ANM e ANM-Tubing Hanger;
- a linha de produção também possui 3 modos de falha: falha Intrínseca do componente, falha por formação de Hidrato ou falha por formação de Parafina, taxas agrupadas ao (estado 60),
- a coluna de produção possui 4 modos de falha: falha Intrínseca do componente, falha por Entupimento, falha por *Tubing Hanger* ou falha por formação de Furo, toas as taxas agrupadas no (estado 29);
- as falhas em *Workover* de Reservatório podem ocorrer por Isolação de Zona de Produção ou por Acidificação/Fratura , taxas agrupadas no (estado 30);

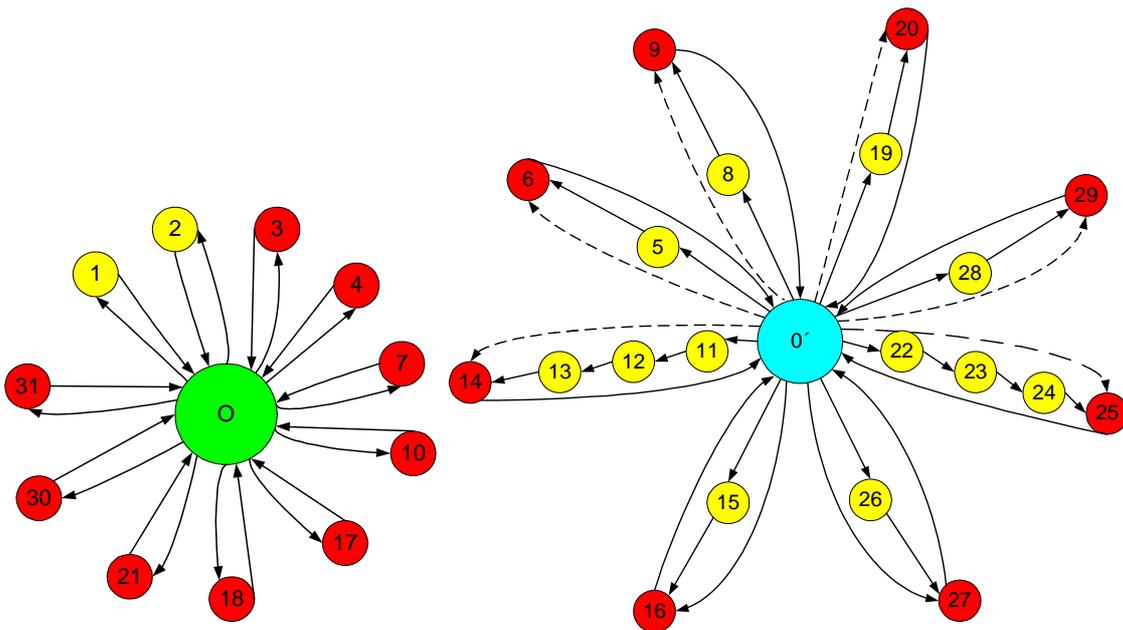


Figura 4.18 – Diagramas de Markov da Malha B

Através do diagrama de Markov, apresentado na Figura 4.18, nota-se que a malha está em operação no estado inicial, representado pelo estado 0 (zero), onde se inicia o tempo de missão do sistema. Opera em modo degradado quando nos estados 1 (Surface Control System falho e em manutenção), 2 (Well Interface Unit falho e em manutenção), 5 (Um dos Cabos Elétricos falho), 8 (Um dos FMU zona 1 falho), 11 (Um dos Sensores T,P zona 1 falho), 12 (Dois dos Sensores T,P zona 1 falho), 13 (Três dos

Sensores T,P zona 1 falho), 15 (Sistema Drenagem/Injeção zona 1 em operação degradada), 19 (Um dos FMU zona 2 falho), 22 (Um dos Sensores T,P zona 1 falho), 23 (Dois dos Sensores T,P zona 1 falho), 24 (Três dos Sensores T,P zona 1 falho), 26 (Sistema Drenagem/Injeção zona 1 em operação degradada), 28 (Coluna em operação degradada). Nos demais estados, a malha estará falha, só retornando à operação normal após parada para reparo do componente.

Tabela 4.09 – Estados da Malha B

Estado	Descrição do Estado	Condição do Sistema
0	Sistema Normal	Operação Normal
1	Surface Control System falho e em manutenção	Degradado
2	Well Interface Unit falho e em manutenção	Degradado
3	Umbilical Elétrico falho	Indisponível
4	Árvore de Natal falha : Intrínseca + Formação de Hidrato Conectores Wet Mateable Elétrico	Indisponível
5	Um Cabo Elétrico Falho	Degradado
6	Ambos os Cabos Elétricos Falhos	Indisponível
7	Packer de Produção zona 1 falho	Indisponível
8	Taxa de Falha de um dos FMU zona 1	Degradado
9	Ambos os FMU zona 1 falhos	Indisponível
10	Válvula elétrica zona 1 (atuação indevida) falha	Indisponível
11	Um dos Sensores T,P zona 1 falho	Degradado
12	Dois dos Sensores T,P zona 1 falhos	Degradado
13	Três dos Sensores T,P zona 1 falhos	Degradado
14	Todos os Sensores T,P zona 1 falho	Indisponível
15	Sistema Drenagem/Injeção zona 1 degradado (Eficiência>Limite)	Degradado
16	Sistema Drenagem/Injeção zona 1 falho (Eficiência<Limite)	Indisponível
17	Packer de Isolação entre zonas falho	Indisponível
18	Packer de Produção da zona 2 falho	Indisponível
19	Taxa de Falha de um dos FMU zona 2	Degradado
20	Ambos os FMU zona 2 falhos	Indisponível
21	Válvula elétrica zona 2 (atuação indevida) falha	Indisponível
22	Um dos Sensores T,P zona 2 falho	Degradado
23	Dois dos Sensores T,P zona 2 falhos	Degradado
24	Três dos Sensores T,P zona 2 falhos	Degradado
25	Todos os Sensores T,P zona 2 falho	Indisponível
26	Sistema Drenagem/Injeção zona 2 degradado (Eficiência>Limite)	Degradado
27	Sistema Drenagem/Injeção zona 2 falho (Eficiência<Limite)	Indisponível
28	Coluna degradada: Rompimento (área) < Limite	Degradado
29	Coluna falha: Rompimento (área) > Limite : Intrínseca	Indisponível
30	Ocorrência de Wokover de Reservatório : Isolação de Zona de Produção e Acidificação/Fratura	Indisponível
31	Linha de Produção falha Intrínseca, Formação de Hidrato e Formação de Parafina	Indisponível

As transições entre estados do sistema, representadas pelo diagrama de Markov da Figura 4.18 acima, estão descritas na Tabela 4.10 a seguir. As mesmas considerações realizadas para malha A devem ser consideradas para malha B, exceto que tem-se quatro sensores idênticos em paralelo, que monitoram temperatura e pressão localizados IPR na malha B, sendo dois na posição coluna e dois na posição anular de cada zona; porém do ponto de vista funcional, a operação de um dos quatro é suficiente para satisfatoriamente obter-se dados de pressão e temperatura.

Tabela 4.10 – Taxas de Transição do Modelo de Markov da Malha B

Transição	Descrição	Expressão
$\lambda_{0 \rightarrow 1}$	Taxa de Falha da Surface Control System	λ_{SCS}
$\mu_{1 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Surface Control System	μ_{SCS}
$\lambda_{0 \rightarrow 2}$	Taxa de Falha da Well Interface Unit	λ_{WIU}
$\mu_{2 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Well Interface Unit	μ_{WIU}
$\lambda_{0 \rightarrow 3}$	Taxa de Falha do Umbilical Elétrico	λ_{UE}
$\mu_{3 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Umbilical Elétrico	μ_{UE}
$\lambda_{0 \rightarrow 4}$	Taxa de Falha da Árvore de Natal : Intrínseca	λ_{ANI}
$\mu_{4 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Árvore de Natal: Intrínseca	μ_{ANI}
$\lambda_{0 \rightarrow 5}$	Taxa de Falha de um dos Cabos Elétricos	$2\lambda_{CE-I}$
$\lambda_{5 \rightarrow 6}$	Taxa de Falha de ambos os Cabos Elétricos	λ_{CE-I+} λ_{CE-CCF}
$\lambda_{0 \rightarrow 6}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Ambos os Cabo Elétricos	λ_{CE-CCF}
$\mu_{6 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo de Ambos os Cabo Elétricos	μ_{CE-CCF}
$\lambda_{0 \rightarrow 7}$	Taxa de Falha do Packer de Produção zona 1	λ_{PP-1}
$\mu_{7 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Packer de Produção zona 1	μ_{PP-1}
$\lambda_{0 \rightarrow 8}$	Taxa de Falha de um dos FMU zona 1	$2\lambda_{FMU-1}$
$\lambda_{8 \rightarrow 9}$	Taxa de Falha de ambos os FMU zona 1	λ_{FMU-1+} $\lambda_{FMU-CCF-1}$
$\lambda_{0 \rightarrow 9}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Ambos os FMU	$\lambda_{FMU-CCF-1}$

	zona 1	
$\mu_{9 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do FMU zona 1	μ_{FMU-1}
$\lambda_{0 \rightarrow 10}$	Taxa de Falha da Válvula elétrica zona 1	λ_{VELE-1}
$\mu_{10 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Válvula elétrica zona 1	μ_{VELE-1}
$\lambda_{0 \rightarrow 11}$	Taxa de Falha de um dos Sensores T,P da Z-1	$4\lambda_{TP-I-1}$
$\lambda_{11 \rightarrow 12}$	Taxa de Falha de dois dos Sensores T,P da Z-1	$12\lambda_{TP-I-1}$
$\lambda_{12 \rightarrow 13}$	Taxa de Falha de três dos Sensores T,P da Z-1	$12\lambda_{TP-I-1}$
$\lambda_{13 \rightarrow 14}$	Taxa de Falha de Todos os Sensores T,P da Z-1	$4\lambda_{TP-I-1+}$ $\lambda_{TP-CCF-1}$
$\lambda_{0 \rightarrow 14}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Todos os Sensores T,P da Z-1	$\lambda_{TP-CCF-1}$
$\mu_{14 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo de Todos os Sensores T,P da Z-1	$\mu_{TP-CCF-1}$
$\lambda_{0 \rightarrow 15}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem/Injeção Z-1 Degradado	$\lambda_{DRE1-DEG}$
$\lambda_{15 \rightarrow 16}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem/Injeção Z-1 Crítica	$\lambda_{DRE1-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 16}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem/Injeção Z-1 Crítica	$\lambda_{DRE1-CRI}$
$\mu_{16 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Sistema de Drenagem/Injeção Z-1	μ_{DRE1}
$\lambda_{0 \rightarrow 17}$	Taxa de Falha do Packer de Isolação entre zonas	λ_{PI}
$\mu_{17 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Packer de Isolação entre zonas	μ_{PI}
$\lambda_{0 \rightarrow 18}$	Taxa de Falha do Packer de Produção zona 2	λ_{PP-2}
$\mu_{18 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Packer de Produção zona 2	μ_{PP-2}
$\lambda_{0 \rightarrow 19}$	Taxa de Falha de um dos FMU zona 2	$2\lambda_{FMU-2}$
$\lambda_{19 \rightarrow 20}$	Taxa de Falha de ambos os FMU zona 2	λ_{FMU-2+} $\lambda_{FMU-CCF-2}$
$\lambda_{0 \rightarrow 20}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Ambos os FMU zona 2	$\lambda_{FMU-CCF-2}$
$\mu_{20 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do FMU zona 2	μ_{FMU-2}
$\lambda_{0 \rightarrow 21}$	Taxa de Falha da Válvula elétrica zona 2	λ_{VELE-2}

$\mu_{21 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Válvula elétrica zona 2	μ_{VELE-2}
$\lambda_{0 \rightarrow 22}$	Taxa de Falha de um dos Sensores T,P da Z-2	$4\lambda_{TP-I-2}$
$\lambda_{22 \rightarrow 23}$	Taxa de Falha de dois dos Sensores T,P da Z-2	$12\lambda_{TP-I-2}$
$\lambda_{23 \rightarrow 24}$	Taxa de Falha de três dos Sensores T,P da Z-2	$12\lambda_{TP-I-2}$
$\lambda_{24 \rightarrow 25}$	Taxa de Falha de Todos os Sensores T,P da Z-2	$4\lambda_{TP-I-2} + \lambda_{TP-CCF-2}$
$\lambda_{0 \rightarrow 25}$	Taxa de Falha de Causa Comum de Todos os Sensores T,P da Z-2	$\lambda_{TP-CCF-2}$
$\mu_{25 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo de Todos os Sensores T,P da Z-1	$\mu_{TP-CCF-1}$
$\lambda_{0 \rightarrow 26}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem/Injeção Z-2 Degradado	$\lambda_{DRE2-DEG}$
$\lambda_{26 \rightarrow 27}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-2 crítica	$\lambda_{DRE2-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 27}$	Taxa de Falha do Sistema de Drenagem-Injeção Z-2 crítica	$\lambda_{DRE2-CRI}$
$\mu_{27 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo do Sistema de Drenagem/Injeção Z-2	μ_{DRE2}
$\lambda_{0 \rightarrow 28}$	Taxa de Falha da Coluna Degradada	$\lambda_{COL-DEG}$
$\lambda_{28 \rightarrow 29}$	Taxa de Falha da Coluna Crítica	$\lambda_{COL-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 29}$	Taxa de Falha da Coluna Crítica	$\lambda_{COL-CRI}$
$\mu_{29 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da coluna	$\mu_{COL-CRI}$
$\lambda_{0 \rightarrow 30}$	Taxa de Ocorrência de Workover do reservatório	λ_{WR}
$\mu_{30 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Ocorrência de WR:	μ_{WR}
$\lambda_{0 \rightarrow 31}$	Taxa de Falha da Linha de Produção	λ_{LP-I}
$\mu_{31 \rightarrow 0}$	Taxa de Reparo da Linha de Produção	μ_{LP-I}

Tendo-se obtidas as estimativas para as taxas de transição mostradas anteriormente na Tabela 4.10, parte-se para os cálculos das métricas de confiabilidade da malha. A matriz de transição do modelo Markoviano da malha B é construída da mesma forma da malha A, de acordo com a equação apresentada na seção 3.3.2, porém modificando-se a quantidade de estados conforme equação abaixo:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \vdots \\ P[X(t) = 31] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{0-0} & \mu_{31-0} \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_{0-31} & \lambda_{31-31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P[X(t) = 0] \\ \vdots \\ P[X(t) = 31] \end{bmatrix}$$

Com o auxílio do programa Markov, a variação da probabilidade do sistema ocupar cada um dos possíveis estados ao longo do tempo de missão especificado, como as demais métricas de confiabilidade, será obtida para análise do comportamento do sistema.

Após resolução das equações de transição, a Tabela 4.11 abaixo, apresenta as métricas de confiabilidade da malha B:

Tabela 4.11 - Métricas de Confiabilidade da Malha B

Métrica de Confiabilidade	Resultado obtido
Tempo operacional Total Esperado	2.84E+04
Tempo Falho Total Esperado	1.54E+04
Taxa de Falha Instantânea ao Final da Missão	6.69E-05
Indisponibilidade Média	3.52E-01
Indisponibilidade Instantânea ao Final da Missão	3.80E-01

Após avaliação da Tabela 4.11 acima tem-se os seguintes resultados:

- a indisponibilidade instantânea do sistema no final do tempo de missão é de 38% têm-se portanto 62% de chances da malha B ao final do tempo de missão se encontrar disponível;
- a indisponibilidade média da malha B durante o tempo de missão é de 35,2%;
- a taxa de falha da malha B ao final da missão é de 0,0000669 falha/hora, ou seja, aproximadamente 7 falhas a cada cem mil horas de operação.

Através da Figura 4.19 apresentada seguir, pode-se observar que o comportamento da Malha B é similar à Malha A em relação a probabilidade de falha, cresce rapidamente nas primeiras horas de operação do sistema, onde a probabilidade da

ocorrência de falhas é maior devido à problemas de natureza técnica, causa de falha comum ou por falhas relativas a defeitos de fabricação, porém esta fase com curto período de duração.

Com relação à degradação dos subsistemas da malha foram utilizados os mesmo coeficientes de degradação por cada uma das três fases de análise do sistema. Onde observa-se, no início de cada fase após inserir-se o percentual de degradação, um aumento na probabilidade de falha.

Através da Figura 4.19 pode-se enunciar que a probabilidade de falha no decorrer do tempo de missão está sempre crescente, chegando a períodos que tenderão ao estado estacionário malha. Porém, devido à aplicação do coeficiente de degradação, a probabilidade de falha volta a aumentar durante esta fase.

O arranjo de alguns componentes da Malha B gera menor probabilidade de falha no sistema. Apesar das falhas tenderem a ser mais frequentes com o passar do tempo devido à deterioração dos componentes, gerando ciclos de reparo com maior frequência.

A partir da terceira fase os componentes da malha estarão com os mesmos valores de taxa de falha até o final do tempo de missão, fazendo com que ocorra uma tendência do sistema atingir o estado estacionário, pois como no caso da malha A não há estados absorventes.

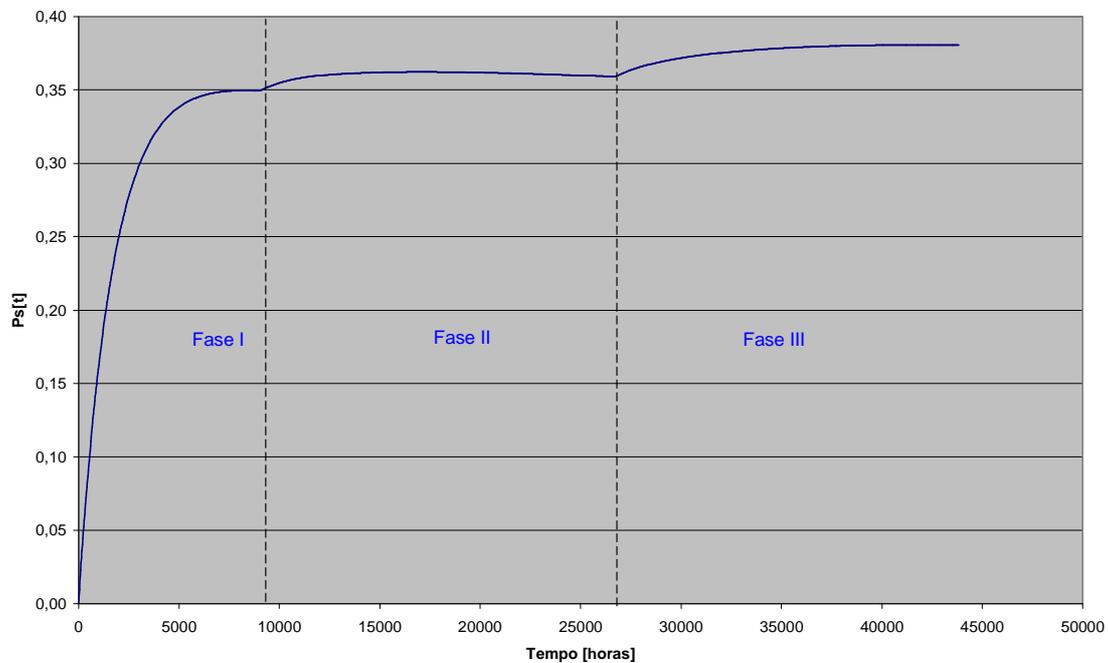


Figura 4.19 – Probabilidade de Falhas da Malha B

Quanto a disponibilidade do sistema, apresentada na Figura 4.20 a seguir, pode-se observar que a probabilidade da malha se encontrar disponível no final do tempo de missão é acima de 60%.

Similarmente ao gráfico anterior, nas primeiras horas de operação do sistema há uma queda da disponibilidade do sistema. Mas a partir da segunda fase até o final do tempo de missão tem-se apenas uma pequena variação da disponibilidade, onde pode-se observar uma tendência a uma taxa constante. As falhas são aleatórias, podendo a probabilidade da falha do componente ser a mesma para qualquer valor do tempo de missão.

A degradação do sistema fornece uma pequena redução da disponibilidade, no início de cada fase, mas a utilização de redundância à alguns subsistemas da malha, gera uma maior disponibilidade ao sistema.

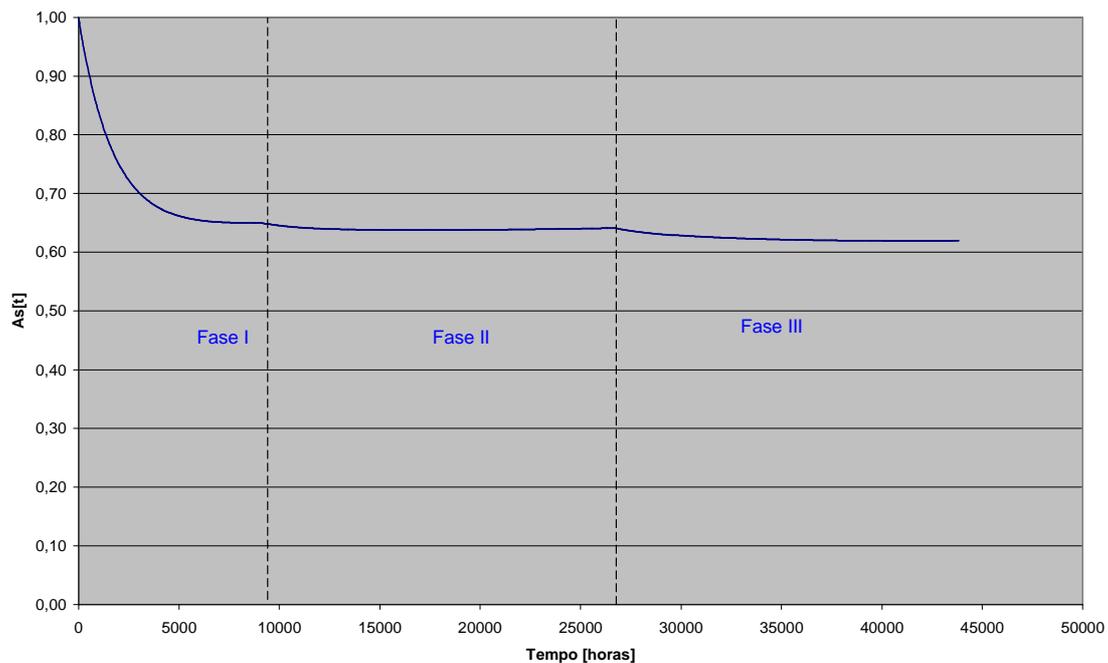


Figura 4.20 – Disponibilidades da Malha B

Nas Figuras 4.21 e 4.22 a seguir, estão representadas respectivamente o número esperado de falhas e reparos do sistema durante o tempo de missão observado. Através dos gráficos chega-se ao número de aproximadamente duas falhas ocorridas e dois reparos efetivados.

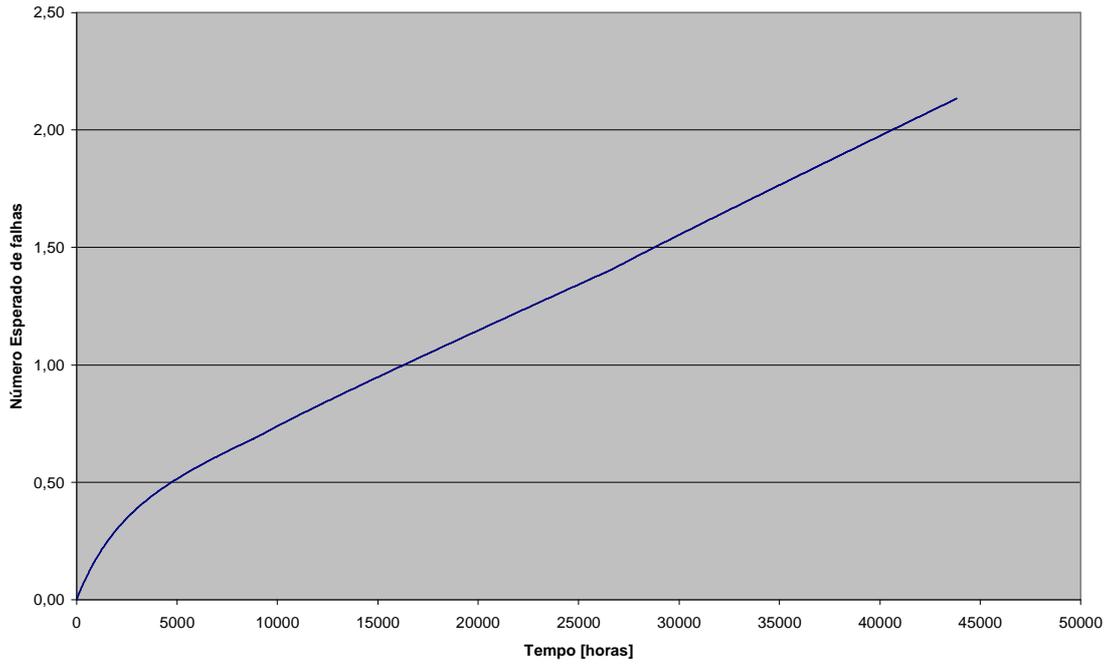


Figura 4.21 – Número Médio de Falhas da Malha B

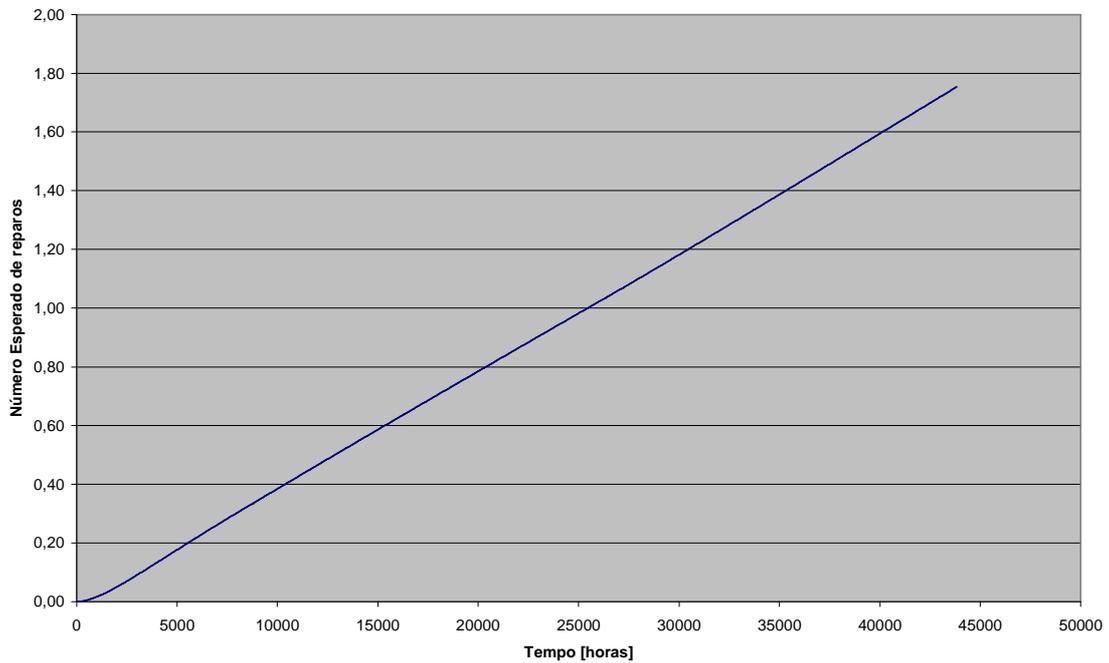


Figura 4.22 – Número Médio de Reparos da Malha B

A análise dos grupos que geram maior contribuição à disponibilidade do sistema, onde os itens que falham e são reparados tendem a voltar a falhar com maior frequência, serão analisados através das Figuras 4.23 a 4.27. Serão analisados os mesmos subsistemas que foram analisados anteriormente na malha A para obtermos uma melhor avaliação entre as duas malhas, ou seja, os grupos correspondentes aos mesmos componentes e subsistemas da malha CI.

Analogamente a malha A, observa-se que os componentes Umbilical e Coluna, são os componentes que contribuem de forma mais significativa para a disponibilidade da malha B. São componentes que possuem uma elevada probabilidade de falha no início da operação do sistema mas, posteriormente, reduzem consideravelmente a probabilidade de falha.

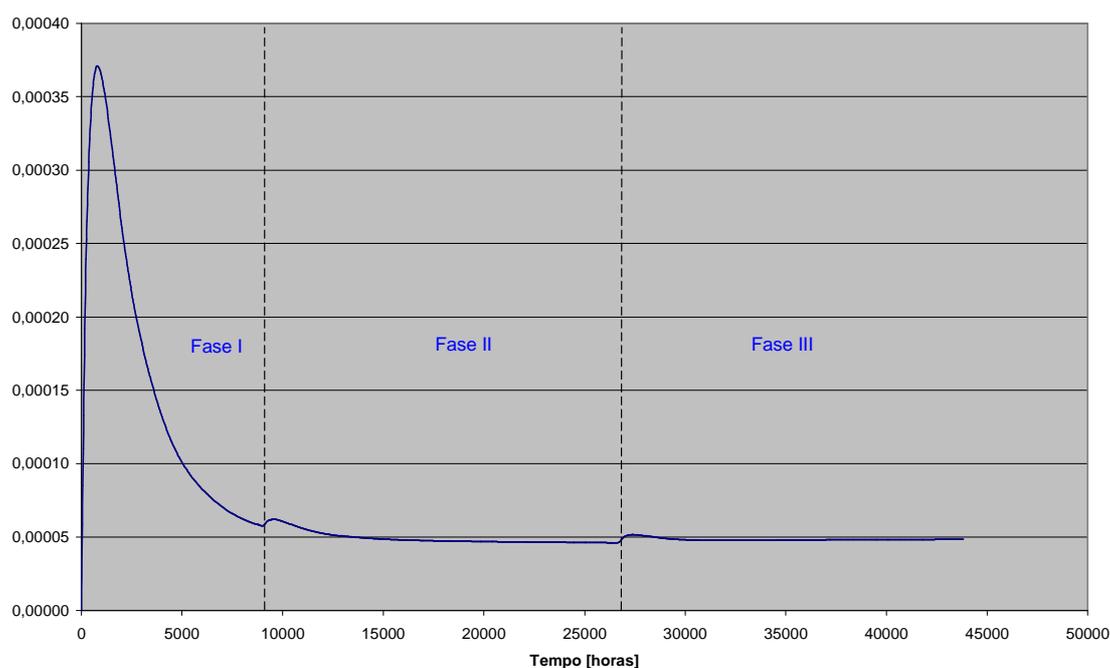


Figura 4.23– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (Umbilical)

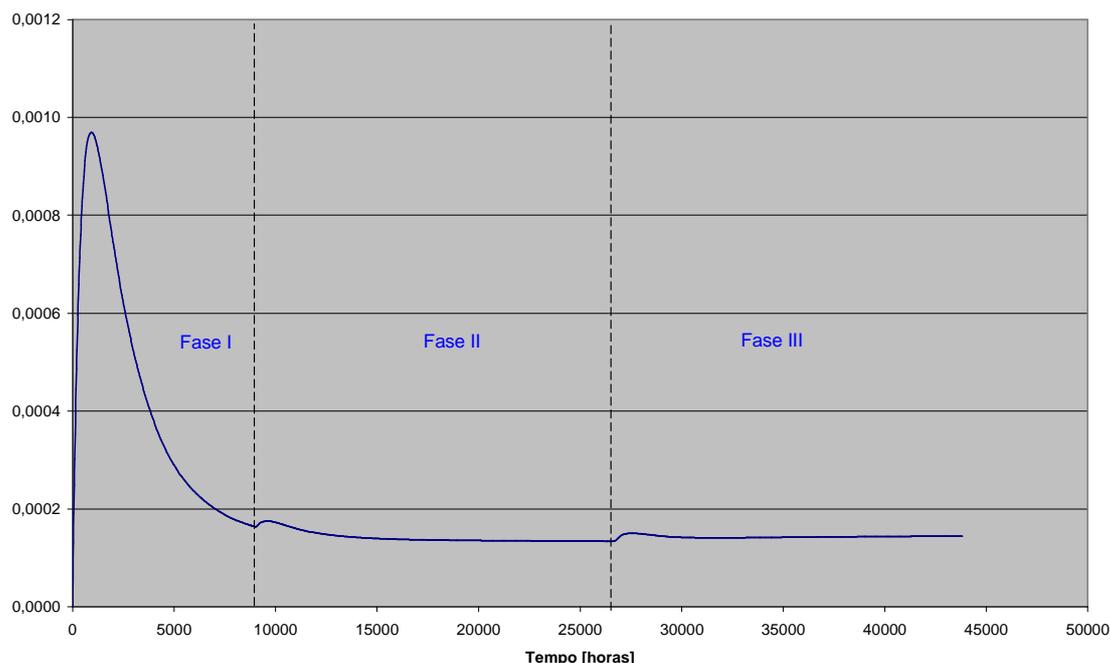


Figura 4.24– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (Coluna)

Em contrapartida os subsistemas que fazem parte da Completção Inteligente, e que a estes foram introduzida redundância, o IPR (*Intelligent Production Regulator*), os quatro Sensores em paralelo que monitoram temperatura e pressão e FMU1 (*Flow Measurement Unit*) que consiste em um venturi interligado a quatro sensores, sendo dois sensores que monitoram temperatura e pressão em paralelo interligados a mais dois em série, ambos com taxas de falha da ordem de 0,00001falha/hora, possuem uma maior probabilidade de tornar o sistema indisponível.

No caso do IPR a malha reduz a probabilidade de falha no final da primeira fase até o início da terceira fase, neste período há um aumento na disponibilidade e posteriormente há um aumento na probabilidade de falha do subsistema e posteriormente tenderá ao estado estacionário.

Porém em relação à malha A observa-se uma diferença durante as primeiras horas de operação do sistema. A malha B aumenta a probabilidade de falha mais lentamente que a malha A e a probabilidade de falha está sempre crescente a medida que o decorre o período de missão previsto. Houve também um aumento da disponibilidade deste subsistema, o que será representado na Figura 4.25 a seguir.

O grupo ANM que consiste de uma junção entre a Árvore de Natal e Conectores Wet Mateable elétrico (Umbilical-ANM) e (ANM-Tubing Hanger), por estar agrupados à componentes da CI revelou desempenho diferenciado ao encontrado na malha A .

Observou-se uma redução da probabilidade de falha após o primeiro ano de operação da malha, gerando uma menor probabilidade de tornar a malha indisponível durante o tempo de missão definido. A este subsistema não foi incluído redundância.

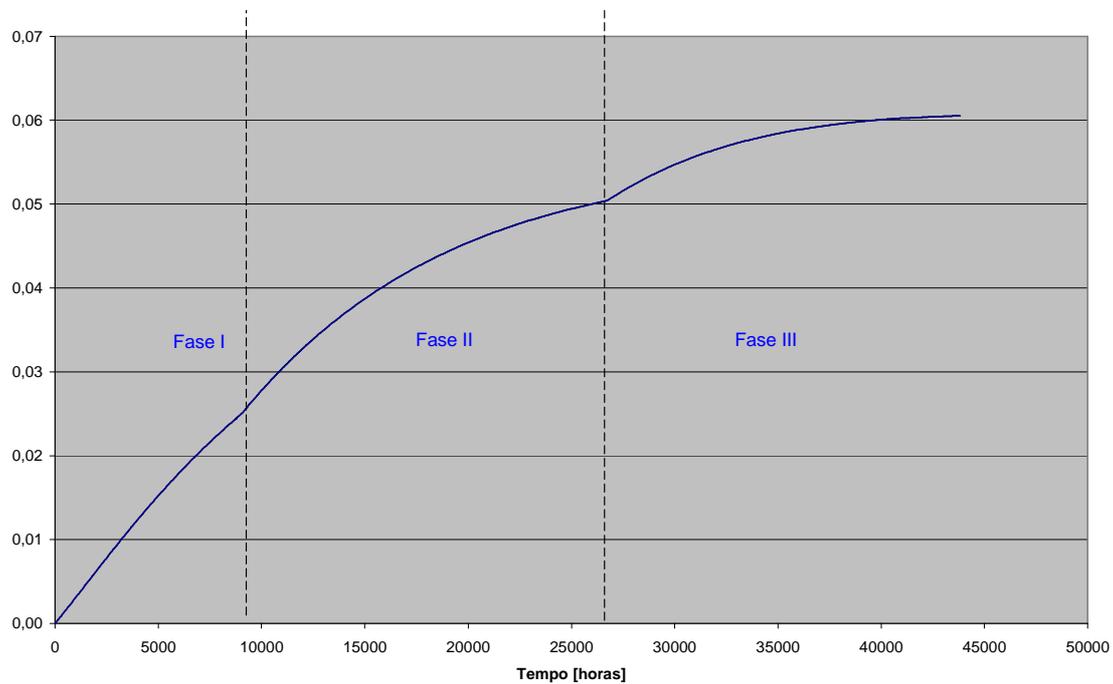


Figura 4.25 – Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (FMU)

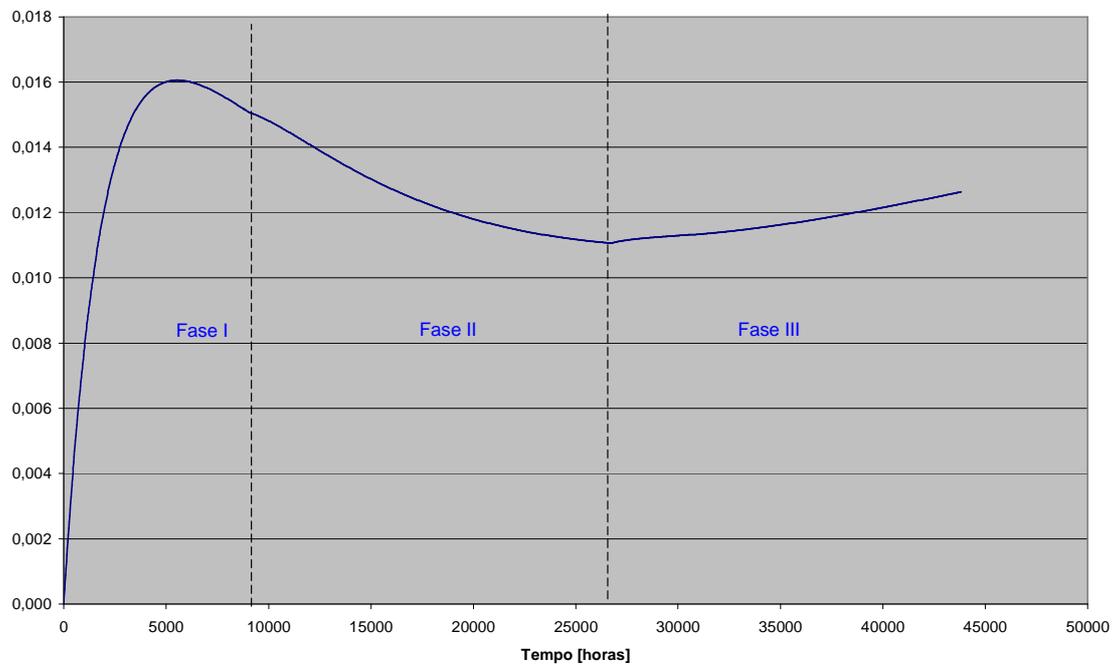


Figura 4.26 – Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (IPR)

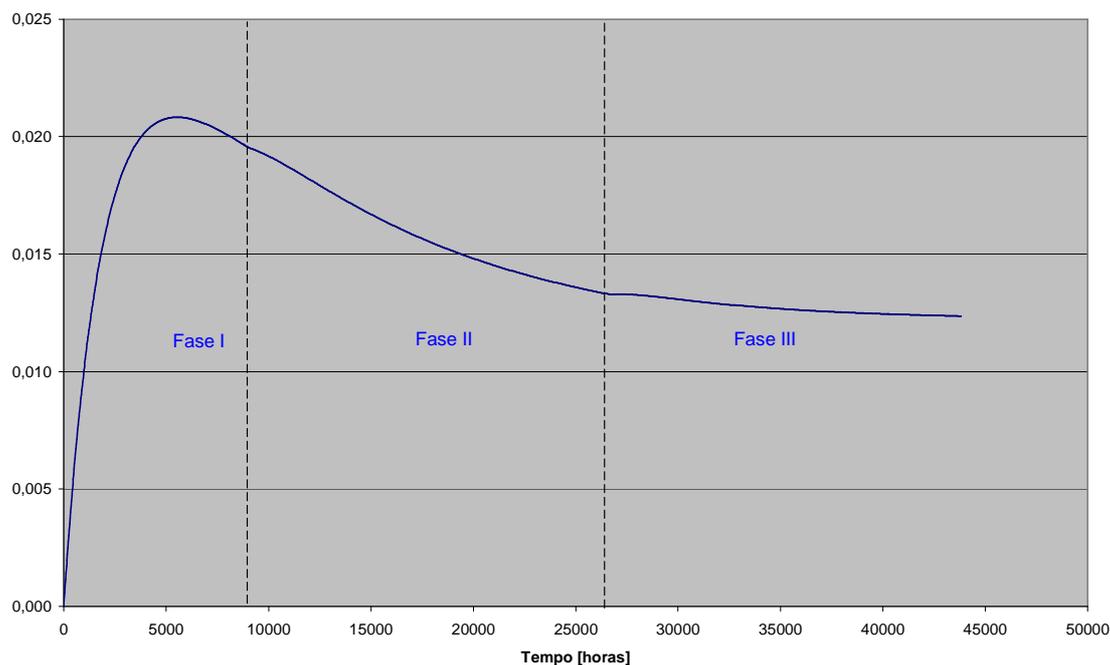


Figura 4.27– Probabilidade de Falha do grupo de Subsistemas da malha B (ANM)

Em resumo, constata-se através dos gráficos apresentados através das Figuras 4.19 à 4.27 que a configuração da malha B, durante o tempo de missão definido, apresenta a probabilidade de se encontrar disponível em aproximadamente 60% deste período. Parte-se, então, para a análise comparativa entre as configuração A e B.

4.2.8 Comparação dos resultados obtidos das Malhas A e B

Através da análise dos gráficos apresentados acima em conjunto com as observações realizadas na apresentação dos resultados da malha A e malha B, pode-se observar de uma forma geral apresentam comportamento semelhantes. Dentre os vários fatores que influenciaram neste resultado, destaca-se a utilização das mesmas taxas de transição para os componentes e subsistemas das duas malhas, diferenciando-se o arranjo das malhas pela quantidade de sistemas redundantes, neste estudo de caso.

De acordo com a Tabela 4.12 abaixo e as Figuras 4.28 e 4.29 nas páginas que se seguem, pode-se chegar as seguintes conclusões, dado que o tempo de missão das malhas e o período de análise da degradação são os mesmos:

- ambas as malhas possuem o mesmo comportamento em relação ao tempo de missão nas primeiras horas de operação do sistema, porém a malha B possui uma menor probabilidade de falha durante o mesmo período;
- quanto à disponibilidade do sistema, a malha B, devido à redundância inserida à alguns subsistemas e componentes da malha, demonstrou uma maior probabilidade de se encontrar disponível durante o tempo de missão;
- com relação à taxa de falha no final da missão, a malha A demonstrou uma maior quantidade de falhas em relação à malha B, aproximadamente uma falha a cada dez mil horas, enquanto a malha B obteve aproximadamente sete falha a cada cem mil horas de operação.

Tabela 4.12 - Métricas de Confiabilidade das Malha A e B

Métrica de Confiabilidade	Resultado	Resultado
	Malha A	Malha B
Tempo operacional Total Esperado	2 anos e 4 meses	3 anos e 3 meses
Tempo Falho Total Esperado	2 anos e 8 meses	1 ano e 9 meses
Taxa de Falha Instantânea ao Final da Missão	1.08E-4	6.69E-05
Indisponibilidade Média	52,8%	35,2%
Indisponibilidade Instantânea ao Final da Missão	49,2%	38%

Os resultados encontrados demonstraram que ainda existe uma grande quantidade de falhas nos sub-sistemas de componentes das malhas de CI, levando à indisponibilidade do sistema como um todo.

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), o tempo de concessão de um poço de petróleo é de trinta anos, dentre estes, três anos na fase de exploração e vinte e sete anos de exploração. Então, tendo-se vinte e sete anos de produção que equivale a aproximadamente 236.655 (duzentas e trinta e seis mil seiscentas e cinquenta e cinco) horas, aproximadamente sete falhas a cada 100.000 (cem mil) horas conforme resultados obtidos da análise da malha B, ainda representa um número elevado de falhas, sinalizando a necessidade de desenvolvimento de sistemas mais confiáveis.

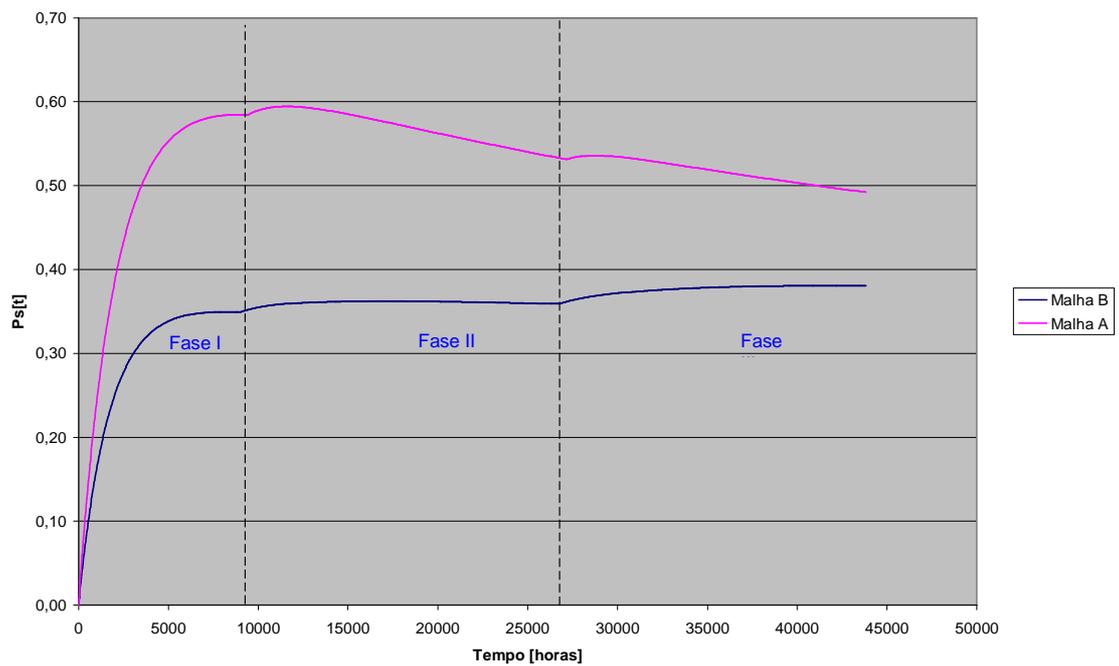


Figura 4.28 – Probabilidade de Falha da Malha A x Malha B

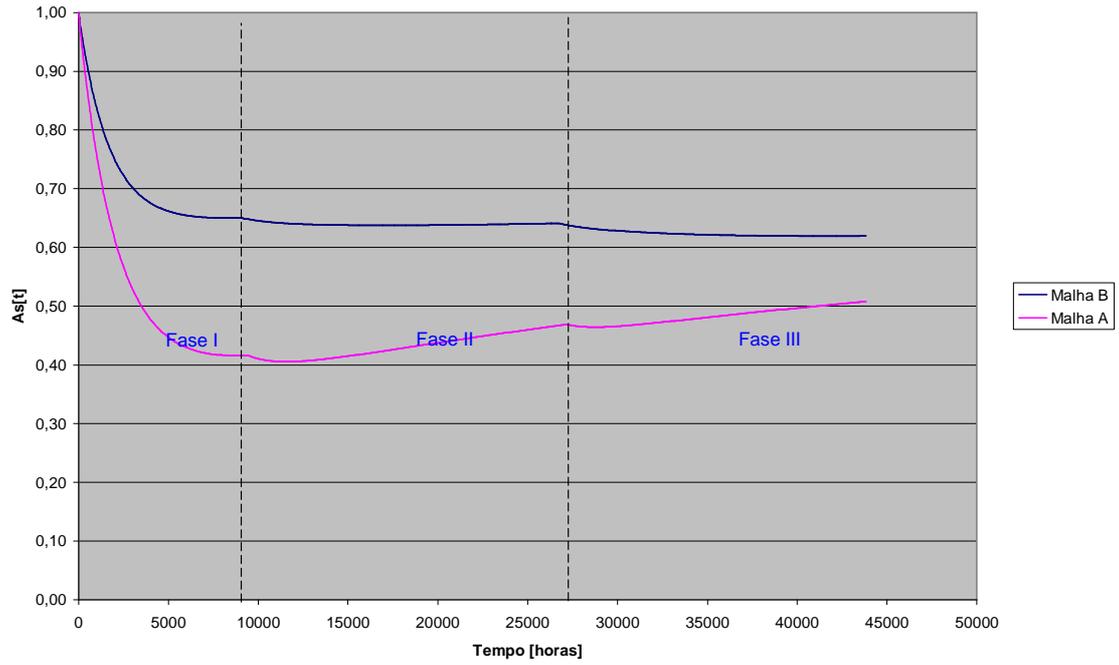


Figura 4.29 – Disponibilidade da Malha A x Malha B

No capítulo seguinte, serão apresentadas as seções de conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Como primeira etapa para o desenvolvimento deste trabalho buscou-se uma abordagem das atualidades e um pouco da história do petróleo, a apresentação da completção convencional e da completção inteligente (CI). Etapa esta que foi cumprida no Capítulo 2, Fundamentação Teórica, onde foram apresentados, além de outros, uma breve revisão bibliográfica sobre confiabilidade dos sistemas de CI. Com a realização desta etapa, foi possível constatar a necessidade de novas tecnologias e estudos direcionados para o aprimoramento das técnicas de produção na obtenção de melhores resultados na extração de petróleo com maior eficiência e menores custos de produção. Foi verificada a importância deste produto na economia mundial, como a principal fonte de energia do mundo segundo Ramalho (2003).

Também abordado como no Brasil e no mundo foi descoberto e como teve início à busca pelo petróleo. Diversas crises que desestabilizaram o mercado, a maioria delas por motivos políticos. O Oriente Médio reduziu sua produção, asseguravam 60% da produção mundial (Ramalho, 2003), aumentando consideravelmente o preço do barril nas demais regiões do mundo. Uma explanação sobre os cinco elementos básicos do petróleo, sua origem e composição, assim como o desenvolvimento de um campo de petróleo, incluindo a perfuração, completção e construção de uma maneira geral do poço, deixando-o capacitado para o início da produção, apresentadas conforme Thomas (2000).

Foram definidos os conceitos, abordados os objetivos e os principais componentes de uma completção convencional e de uma completção inteligente (CI). No que se refere a CI, trata-se de uma nova tecnologia que envolve monitoração e controle do desempenho de reservatórios durante o ciclo de vida de um poço de petróleo, além do monitoramento e gerência dos reservatórios de petróleo em tempo real e de forma interativa (Trujillo & Maldonado, 1998). As principais diferenças entre completção “burra”, segundo Dev (2003), e a CI, pode-se resumir, conforme Strand &

Ansell & Raudand (2000), na capacidade de desenvolver trabalhos em campos sensíveis (áreas com elevadas temperatura e pressão), na aceleração da produção, na possibilidade de produzir de diferentes zonas, na minimização ou eliminação da necessidade de intervenções, na integração da gerência de reservatório e de produção, como forma de otimizar a recuperação de reservatórios, obtenção de dados de reservatório com maior qualidade e otimização de projetos de infra-estrutura submarina e de superfície.

Com a conclusão desta primeira etapa, percebeu-se que devido à escassez de informações que possam viabilizar um alto investimento na aquisição de componentes/subsistemas de monitoração e controle de poços, poucos estudos foram desenvolvidos sobre a confiabilidade destes sistemas. Neste enfoque, a **confiabilidade** é analisada como a falha de um dos componentes/subsistemas no controle, na aquisição da medida ou na transmissão da mesma. Segundo Eck (1999), a estabilidade nas medidas é importante devido à necessidade de se obter medidas concisas e precisas. Adquirir confiabilidade significa novos estudos e pesquisas nesta nova área para fornecer ferramentas de apoio à decisão e fornecer maior confiabilidade à esta nova tecnologia.

No Capítulo 3 foi apresentada e discutida a metodologia híbrida sugerida para a avaliação da disponibilidade de sistemas de CI. Esta metodologia consiste no emprego da Metodologia Bayesiana, para o tratamento de dados escassos e com elevada incerteza, e o Processo de Markov para modelagem e avaliação da disponibilidade de malhas de CI, utilizando Missões de Múltiplas Fases no tratamento da degradação do sistema, dentro do contexto Markoviano. A aplicação desta metodologia em sistemas constituídos por um grande número de componentes tornou-se possível devido à utilização de programas que auxiliaram no desenvolvimento e aquisição de resultados nos cálculos das equações Bayesianas e das matrizes de transição, fornecendo as métricas de confiabilidades, base deste estudo. Neste capítulo, foram explanados definições e conceitos sobre confiabilidade e disponibilidade de sistemas, bem como análises de falhas de sistemas, falhas dependentes, falhas de causa comum, entre outras definições importantes para o entendimento deste trabalho. As falhas de causa comum, falhas dependentes em que dois ou mais estados falhos de componentes existam ao mesmo tempo, ou em um curto espaço de tempo, foram quantificadas e representadas mediante o modelo do fator Beta. Dentro da Metodologia Bayesiana, um novo conceito foi abordado: a mistura de distribuições para obtenção da função verossimilhança que melhor represente um conjunto de dados disponíveis. A modelagem via Processos de

Markov apresentou os diagramas de blocos, diagramas de transição e como são adquiridas as métricas de confiabilidade relativas ao sistema em estudo.

Na continuação do trabalho, com base nos dados e informações obtidos no capítulo de metodologia aplicada, desenvolveu-se um estudo de caso para pôr em prática esta metodologia. Este estudo de caso foi apresentado no Capítulo 4, Modelagem e Simulação de malhas de completção inteligente, onde duas configurações de malhas de CI foram detalhadas e expostas suas diferenças e similaridades. Cada malha foi caracterizada em termos dos subsistemas considerados em cada tipo de malha, diferenciado pela nomenclatura malha A e malha B. As taxas de transição para cada subsistema das malhas analisadas foram obtidas de diversas fontes, como bancos de dados de confiabilidade (OREDA, 2000), opinião de especialistas e dados operacionais, tratadas através da metodologia Bayesiana. Em seguida, foram apresentados os diagramas de blocos, os estados referentes a cada malha e os diagramas de transição, bem como os resultados obtidos através desta análise para cada configuração.

A partir dos resultados da simulação, foi possível perceber que a quantidade de subsistemas redundantes, principal diferença entre as malhas de CI estudadas, aumenta a disponibilidade do sistema durante o tempo de missão. Os resultados fornecidos através do processo Markoviano possibilitaram a verificação do comportamento da disponibilidade das malhas, assim como as probabilidades de falha durante o período de operação do sistema. Além da análise gráfica, métricas de confiabilidade como a indisponibilidade instantânea ao final da missão, a indisponibilidade média e, a taxa de falha instantânea no final da missão foram obtidas com a finalidade de analisar qual das duas configurações é a mais vantajosa em termos de disponibilidade. Chegou-se à conclusão, após a avaliação dos resultados obtidos, que a malha B, cuja configuração possui maior quantidade de subsistemas redundantes, é mais vantajosa. As taxas de transição fornecidas para o desenvolvimento deste estudo de caso foram bastante relevantes nos resultados alcançados.

A escassez de dados operacionais referentes às taxas de falha do sistema CI, que poderiam fornecer melhores resultados com relação à disponibilidade destes sistemas, gerando uma análise mais completa e com informações mais precisas e úteis para o desenvolvimento e melhoramento dos sistemas de CI, foi considerada uma das limitações deste trabalho. Outra limitação foi a não realização de questionários de educação para, através de programações matemáticas, trabalhar numa família de distribuições de probabilidade na calibração do especialista, além da utilização de outras

metodologias que levariam à aquisição de melhores resultados, descritas a seguir em recomendações para trabalhos futuros. Porém, deve-se enfatizar que não foi objetivo deste trabalho apresentar e aplicar tais metodologias.

Desta forma, pode-se concluir que foram alcançados os objetivos deste trabalho:

- a apresentação da Metodologia Bayesiana e Markoviana para modelagem e avaliação da disponibilidade de malhas de CI;
- a utilização de Missões de Múltiplas Fases no tratamento da degradação do sistema, dentro do contexto Markoviano;
- a utilização de dados subjetivos obtidos através da modelagem da opinião de especialistas, banco de dados de confiabilidade (OREDA, 2002) e dados operacionais.

Através da análise Bayesiana, esses dados foram usados na atualização o estado de conhecimento sobre as taxas de transição dos modelos Markovianos de disponibilidade. E dentro do estudo de caso desenvolvido, dois cenários distintos foram modelados e simulados para aquisição das métricas de confiabilidade.

O mesmo pode ser dito em relação aos objetivos específicos, de fato, foi verificado como a completção inteligente pode evoluir em termos de confiabilidade de seus componentes. Apresentada a metodologia híbrida Markov e Bayes, desenvolvida neste trabalho, para modelagem destes sistemas complexos, descrevendo o comportamento dinâmico destes sistemas. E a modelagem da degradação do sistema, via processos de missões de múltiplas fases.

Apesar das conclusões descritas, é importante salientar que esta pesquisa não visa esgotar o tema abordado, principalmente porque se trata de uma tecnologia bastante recente em que a confiabilidade do sistema significa custos. Desta forma, acredita-se que o presente trabalho representa uma parcela de contribuição na área, fornecendo mais uma base de informações para futuras pesquisas.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Os resultados deste trabalho acrescentam conhecimento e integram o início de estudos realizados na área de Confiabilidade de sistemas como a completação Inteligente em poços de Petróleo. Muitos estudos ainda serão realizados para aprimoramento da análise destes sistemas. Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se:

- a modelagem de malhas de CI utilizando a metodologia discutida neste trabalho, porém com dados mais concisos e em maior quantidade e, principalmente, dados operacionais;
- a aplicação de análises de sobrevivência para análise e modelagem da degradação do sistema (Colosimo, 2001);
- a utilização de questionários de educação, para através de programações matemáticas, trabalhar numa família de distribuições de probabilidade na calibração do especialista quanto a sua vagueza e precisão. (Campello de Souza, 2002).

Esta pesquisa foi de grande importância na tomada de decisões para a indústria petrolífera, refletindo a necessidade de novos estudos com dados mais concisos, que forneçam informações para o aprimoramento desta tecnologia, e maior credibilidade e eficiência nos processos de produção de Petróleo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGEROY, J. *Controlling Reservoir from Afar*, Oilfield Review 7, No.4, p.18-29, Autumn, 1999.

ARMSTRONG, C .C. AND D. MATTHEW. *Management of Water Breakthrough Using Intelligent Well Technology*, Texas, Offshore Technology Conference, Maio/2001.

BERNARDO, E. M. C. *Processos Markovianos de Decisão*, 1999. No.7936. (Licenciatura em Matemática – F.C.T./U.N.L.).

BORG, K.E., *Reliability and Life Cycle Cost/Profit Assessment os Intelligent Well Systems*. Noruega, 2001. 112p. (Mestrado – Norwegian University os Science and Tecnology).

BRICK, E. S.; MIRANDA, M. A. *Modelo de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de sistemas, aplicado a plataformas de petróleo*. Rio de Janeiro, v.2, p.1-9, Núcleo de Logística Integrada e Sistemas (LOGIS/UFF) & Departamento de Engenharia de Produção (UFF), 2003.

CARLIN AND LOUIS, B.P. AND T.A. *Bayes and Empirical Bayes Methods for Data Analysis*. Ed. Chapman & Hall. 1996.

CAMPELLO DE SOUZA, F. M., *Decisões racionais em situações de Incerteza*. Recife, Editora Universitária da UFPE, 2002.568p.

COLOSIMO, E. A., *Análise de sobrevivência aplicada*. Piracicaba, RBRAS, 2001.150p.

DAVIS, M.H.A., *Markov Models and Optimization*. Ed. Chapman & Hall. 1993.

DEV, G. , *Poços Inteligentes*, 2002. www.oilandgasinternational.com. Acesso em 29 de Março de 2003.

DEZEN, F.J.P., *Opções Reais Aplicadas à Escolha de Alternativa Tecnológica para o Desenvolvimento de Campos Marítimos de Petróleo*. Campinas, 2001.100p. (Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências Universidade Estadual de Campinas).

DOCHORTY, M., *Permanent Monitoring Subsurface Systems*, 2002. www.schlumberger.com.br. Acesso em 03 de Abril de 2003.

DROGUETT, E.L. *Confiabilidade e Análise de Risco*. Recife, PPGEP/UFPE, 2002, 85p.

DROGUETT, E. L., *Notas de Aula de Confiabilidade*, Mestrado, PPGEP/UFPE, Recife, 2002, 70p.

DROGUETT, E. L., *Confiabilidade de malhas de Completação Inteligente*. Recife, PPGEP/UFPE, 2002, 115p.

DROGUETT, E. L., *Modelos de Markov em Confiabilidade*. Recife, PPGEP/UFPE, 2002, 64p.

DROGUETT, E. L., *Estimando a Confiabilidade de Produtos em Desenvolvimento*, Recife, PPGEP/UFPE, p.1-13, 2002.

ECK, J. , *Downhole Monitoring : The Story So Far*, Oilfield Review 7, No.4, p.20-33, Winter/1999.

FLEMING,K.N., *A Reliability Model for Common Mode Failures in Redundant Safety System*. Proceeding of the Sixth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation, Instrument Society of America, Pittsburgh, PA, 1975.

GISBERGEN, S. J. C. H. M.; Vandeweyer, A. A. H. *Reliability Analysis of permanent downhole monitoring systems*, Offshore Technology Conference, OTC 10945, Março/1999.

GROEN F. J.; DROGUETT E. L., *Bayesian Estimation of the Variability of Reliability Measures*. USA, Reliability Engineering & System Safety , Junho/2003.

GROEN F. J.; DROGUETT E. L., *Modelagem e Simulação da Confiabilidade de Completações Seca e Submarina*, USA, Reliability Engineering & System Safety, Novembro/2003.

GROEN F. J.; DROGUETT E. L.; MOSLEH, A., *The Combined Use of Data and Sources Estimates in Population Variability Analysis. Reliability Engineering Program*. USA, Reliability Engineering & System Safety , p.311-321, outubro/2003.

HADDAD,S. *História da Engenharia de Petróleo*, 2002. www.slb.com/seed/pt/career/geoscience/history.htm. Acesso em 10 de Fevereiro de 2003.

JACINTO, C. M. C., *Modelagem e Simulação do Risco na Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás em Águas Profundas*. Niterói, 2002. 284p. (Mestrado – Universidade Federal Fluminense).

JANSEN, J.D. Smart Wells, Delft University of Technology – Department Petroleum Engineering & Shell E&P Technology Applications, p.1-11, Fevereiro/2001.

KAPLAN, E.L.; MEIER, P. *Nonparametric Estimation from Incomplete Observations*, Journal of the American Statistical Association 53 (1998) 98-109.

LAFRAIA, J.R.B. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Ed. QUALUTYMARK, 2001.

LATHAM, A. *Águas profundas são futuro do setor*, 2002. www.dep.fem.unicamp.br. Acesso em 29 de Março de 2003.

LAWTON, M. *Uncertainty about the extent of current oil reserves means that the oil industry is constantly looking for new sources and extraction techniques*, Here Na International Magazine from Alfa Laval, p. 5-6 , Março/2003.

LUCCHESI, C.F. *Petróleo*, www.comciencia.br/reportagens/petroleo/pet06.shtml. Acesso em 20 de Março de 2003.

MARIOT, F. *O Petróleo*, www.terra.com.br/almanaque/história/petroleo1.htm. Acesso em 11 de Fevereiro de 2003.

MARTZ, H.F.; WALLER, R.A . *Bayesian Reliability Analysis*. Original edition. Krieger Publishing Company – Malabar, Florida, 1982.

MASON, J. and LAIDLAW, J. *North Sea Plataform proves permanent monitoring reliability*, Edition Offshore by Penn Well Corporation, p.1-2, Fevereiro/2003.

MATHIESON, D.; ROGERS, J.; RAJAGOPALAN, S; MCMANUS, R., 2003. *Reliability assurance, managing the growth of Intelligent Completion technology*, Colorado, U.S.A . www.periodicos.capes.gov.br. Colorado, v.5, Society of Petroleum Engineers Inc, p.1-8, outubro/2003.

MATTOS, N. M. C. *Estimação Bayesiana de tempo de falha utilizando modelos de degradação*. Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia , p.1-12, 2002..

MATTOS, N. M. C. *Análise Bayesiana da confiabilidade de produtos submetidos a testes de degradação acelerados*. Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia, p.1-12, 2002.

MEDEIROS, M.C. *Séries Temporais: Processo Estocástico*. Rio de Janeiro, Departamento de Economia Pontíficea da Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO, 2000, 20p.

MODARRES, M. *Reliability Engineering and Risk Analysis*. New York, Ed. Marcel Dekker, 1999.

MOSLEH, A. *Procedure for Treating Common Cause Failure in Safety and Reliability Studies*, 1988. U.S. Comissão Reguladora Nuclear, NUREG/CR-4780, Vol. I e II, Washington, DC.

MOSLEH, A.; SIU, N.O., *A Multi-parameter, Event-based Common-cause Failure Model. Proc. Of the Ninth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Lausanne, Switzerland, 1987.

MOSLEH, F.J. *Elicitation and Use of Expert Opinion in Reliability and Risk Assessment*. USA, 1983. 55p. (Mestrado – University of Maryland).

OLIVEIRA, A. *O Petróleo é a principal fonte de energia do mundo*, 2002. www.comciencia.br. Acesso em 26 de Março de 2003.

OREDA, phase VI, www.oreda.com, 2002.

RAMALHO, R. *Que futuro esperar para o ouro negro? / O petróleo no Brasil / Petróleo e meio ambiente / História do petróleo no Brasil / O início da indústria do petróleo no Brasil*, 2000. www.uol.com.br/cienciahoje/especial/naturais/petro2.htm. Acesso em 29 de Março de 2003.

RAUSAND, M., *Hazard Identification (HAZID)*. August 2000, NTNU, Norway. Lecture Notes.

RAUSAND, M., *Risk and reliability in Subsea Engineering*, Department of Production and Quality Engineering. NTNU, August 2000.

REDAT PLUS, programa de computador software, Prediction Technologies INC. www.prediction-technologies.com, 2003.

ROBINSON, M. *Intelligent Well Completions*, Society of Petroleum Engineers, p.8, Agosto/2003. www.spe.com. Acesso em 02 de Novembro de 2003.

SCHIOZER, D. J. *Análise de Risco no Desenvolvimento de Campos de Petróleo*, 2003. www.cepetro.unicamp.br/. Acesso em 29 de Março de 2003.

SHAH, M. *Real-Time Signal Processing and Hardware Development for a Wavelength Modulated Optical Fiber Sensor System*. Virginia, 1997. 88p. (Doctor – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University).

SILVA JR, M.F. *Completação Inteligente*, Rio de Janeiro, PUC-RIO, p.1-4, Outubro/2003.

SIU N. O. ; KELLY, D. L., *Bayesian parameter estimation in probabilistic risk assessment*, Washington, Reliability Engineering & System Safety 1998; 62(1-2); 89-116.

SPIEGEL, M. R. *Transformada de Laplace*. São Paulo, Mc Graw Hill, 344p. 1971.

STRAND, G.O.; ANSELL J.; RAUSAND M. *Modeling of intelligent wells forecasting life-cycle costs*. Scotland, SINTEF Petroleum Research, p.1-9, Dezembro/ 2001.

SUSICK, S.B. *Regulação do Petróleo de Gás Natural*. Rio de Janeiro, Impresso do Brasil, Campinas, SP. 2001.

SUSICK, S.B. *Águas Profundas no Brasil – Os próximos passos para alcançar 3000 metros*. Revista T&N Petróleo. Acesso em 26 de Março de 2003.

TAN, Z. *Bayesian analysis with consideration of data uncertainty in a specific scenario*, USA, v.79, Reliability Engineering & System Safety , p.17-31, Agosto/2002.

TECHNISCHE, K. R. *programa de computador software CARA 2,0 ELAC Technische* . No. 9 Do Vol 24. Setembro 2001.

THOMAS, J. E. org., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, PETROBRAS SA, 2000.

TRUJILLO, M.; MALDONADO, B., *Intelligent Completion Systems*, USA, p.1-55
Novembro/1998.

VENESULO, A .F., KOHLI H.; WEBSTER M.J., *Towards Truly Permanent Intelligent Completions: Lifelong System Survivability Through a Structured Reliability Assurance Process*. Colorado, Society of Petroleum Engineers INC., Outubro/2003.

VOGT, C. *O Petróleo é nosso*, 2002. www.comciencia.br. Acesso em 26 de Março de 2003.

ZHANG, R. *Bayesian methodology for reliability model acceptance*. USA, v.80, *Reliability Engineering & System Safety* , p.5-103, Novembro/2003.