

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA
MANUTENÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS EM ÁGUAS
PROFUNDAS**

HELDER MAMEDE FROTA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO - LENEP**

**MACAÉ - RJ
DEZEMBRO - 2003**

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS EM ÁGUAS PROFUNDAS

HELDER MAMEDE FROTA

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Reservatório e de Exploração

Orientador: Antônio Carlos V. M. Lage

MACAÉ - RJ
DEZEMBRO - 2003

622.338

F941d

2003

Frota, Helder Mamede.

Desenvolvimento de método para planejamento da manutenção de poços petrolíferos em águas profundas / Helder Mamede Frota. --- Macaé: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro / Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, 2003.

xv, 149p. : il.

Bibliografia

Tese de mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração.

1. Engenharia de petróleo – tese. 2. Manutenção em poços – planejamento – tese. 3. Engenharia de confiabilidade - tese. 4. Análise de falhas – tese. I. Título.

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS EM ÁGUAS PROFUNDAS

HELDER MAMEDE FROTA

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Reservatório e de Exploração

Aprovada em 05 de dezembro de 2003

Comissão Examinadora:

Prof. Paulo Roberto Ribeiro (Ph.D., Engenharia de Petróleo – UNICAMP)

Rosana Fátima Teixeira Lomba (Ph.D., Engenharia de Petróleo - PETROBRAS)

Prof. Wellington Campos (Ph.D., Engenharia de Petróleo – UENF/CCT/LENEP)

Prof. Antônio Carlos Vieira Martins Lage (Ph.D., Engenharia de Petróleo - PETROBRAS) (Orientador)

À minha esposa Eveline e ao meu querido filho Helder Mamede Frota Filho que me incentivaram a buscar um novo aprendizado e a tornar este projeto realidade.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, Supremo Criador, que tornou possível a realização deste trabalho, minha máxima homenagem e o meu mais profundo reconhecimento.

À minha mãe, Helena, responsável pela minha alfabetização e ao meu pai, Francisco Mozart, pela minha formação acadêmica. Por todo o apoio e incentivo, minha gratidão.

Ao orientador Antônio Carlos V. M. Lage (PETROBRAS) pelo apoio durante todo o trabalho, pelo interesse, dedicação, críticas e sugestões na orientação desta dissertação.

Ao engenheiro Ricardo de Melo e Silva Accioly (PETROBRAS) pela indicação de diversas referências bibliográficas e pelo tempo despendido na orientação para a análise e preparação prévia dos dados.

A PETROBRAS, representada pelo engenheiro Ricardo Juniti Bernardo que desde cedo soube valorizar e reconhecer o alcance deste trabalho. Por todo o apoio e compreensão quanto aos recursos necessários à realização deste projeto.

Aos professores da UENF pela compreensão e incentivo durante todo o curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	2
1.3 ABRANGÊNCIA DO ESTUDO	3
1.4 DADOS COLETADOS	4
1.4.1 Definição do Sistema Poço	7
1.4.2 Operações de Manutenção em Poços	13
1.4.3 Definição do Conceito de Falhas para o Sistema Poço	15
1.4.4 Hipóteses Básicas Relativas aos Dados	16
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 HISTÓRICO / MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA / CONFIABILIDADE	17
2.2 MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA NA ENGENHARIA DE POÇOS	18
2.3 CONCEITOS BÁSICOS	23
2.3.1 Conceito de Confiabilidade	23
2.3.2 Conceito de Taxa de Falha	26
2.3.3 Conceito de Censura	28
2.3.3.1 Tipos de Censura	29
2.4 ANÁLISE NÃO PAR	

2.5	MODELOS DE TEMPO DE VIDA: DISTRIBUIÇÕES	31
2.5.1	Distribuição Exponencial 1	32
2.5.2	Distribuição Exponencial 2	34
2.5.3	Distribuição de Weibull 2	34
2.5.4	Distribuição de Weibull 3	35
2.5.5	Distribuição Normal	36
2.5.6	Distribuição Lognormal	36
2.6	INFERÊNCIA PARA MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA	37
2.6.1	Método da Máxima Verossimilhança	38
2.6.2	Teoria dos Estimadores de Máxima Verossimilhança	40
2.6.3	Máxima Verossimilhança Aplicados a Dados Censurados	41
2.6.4	Testes de Hipóteses	43
CAPÍTULO 3 – COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS		46
3.1	INTRODUÇÃO	46
3.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	46
3.3	BANCOS DE DADOS EXISTENTES	47
3.3.1	NewBD	47
3.3.2	SDC	48
3.3.3	SEP	48
3.3.4	DIMS	49
3.3.5	BDCA	49
3.3.6	CRONOGRAMA	50
3.3.7	PROGRAMA DE INTERVENÇÃO	50
3.3.8	ADiP/SaD	51
3.3.9	SIP	51
3.4	DADOS COLETADOS	54
3.5	METODOLOGIA DA COLETA DE DADOS	55
3.6	CRITÉRIOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO / PREMISSAS	56
3.7	CONFIABILIDADE DOS BANCOS DE DADOS	58
3.8	TABULAÇÃO DOS DADOS	59
3.9	INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS	59
3.10	CURVA DE APRENDIZADO	69
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE / ANÁLISE PROBABILÍSTICA.		71
4.1	INTRODUÇÃO	71
4.2	O PROGRAMA “WEIBULL ++ 6.0”	72
4.3	ANÁLISE DAS FALHAS	72
4.4	ANÁLISE DOS POÇOS PRODUTORES	73
4.4.1	AJUSTE DE WEIBULL PARA OS POÇOS PRODUTORES	80
4.4.2	COMPETIÇÃO ENTRE MODOS DE FALHAS	91
4.5	ANÁLISE DOS POÇOS INJETORES	106
4.5.1	AJUSTE DE WEIBULL PARA OS POÇOS INJETORES	113

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
5.1 CONCLUSÕES	124
5.2 RECOMENDAÇÕES	126
APÊNDICE	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1.: ESQUEMA DOS TIPOS DE POÇOS QUANTO À TRAJETÓRIA	10
FIGURA 1.2.: ESQUEMA DE POÇO PRODUTOR VERTICAL SUBMARINO TÍPICO	11
FIGURA 1.3.: ESQUEMA DE POÇO INJETOR HORIZONTAL SUBMARINO TÍPICO	12
FIGURA 2.1.: CURVA DA BANHEIRA	28
FIGURA 3.1.: FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS	53
FIGURA 3.2.: PANORAMA GERAL DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS	61
FIGURA 3.3.: PANORAMA GERAL DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS PRODUTORES	63
FIGURA 3.4.: PANORAMA GERAL DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS INJETORES	65
FIGURA 3.5.: PRINCIPAIS CAUSAS GERADORAS DE INTERVENÇÃO	67
FIGURA 3.6.: MOTIVOS GERADORES DE INTERVENÇÕES EM FUNÇÃO DAS DURAÇÕES ...	68
FIGURA 4.1.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM 2 PARÂMETROS ..	74
FIGURA 4.2.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM 3 PARÂMETROS ..	75
FIGURA 4.3.: AJUSTE DOS DADOS PARA A DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL COM 1 PARÂ- METRO	76
FIGURA 4.4.: AJUSTE DOS DADOS PARA A DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL COM 2 PARÂ- METROS	77
FIGURA 4.5.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL	78
FIGURA 4.6.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO NORMAL	79
FIGURA 4.7.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM 2 PARÂMETROS E INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 90%	82
FIGURA 4.8.: CONFIABILIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO	83
FIGURA 4.9.: PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DO TEMPO	84
FIGURA 4.10.: FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (Pdf)	85
FIGURA 4.11.: FUNÇÃO TAXA DE FALHA PARA POÇOS PRODUTORES	86
FIGURA 4.12.: SUPERFÍCIE DE CONTOURO	87
FIGURA 4.13.: SUPERFÍCIE DA FUNÇÃO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA	88
FIGURA 4.14.: HIDRATO	95
FIGURA 4.15.: LINHAS	96
FIGURA 4.16.: ÁRVORE DE NATAL MOLHADA (ANM)	97
FIGURA 4.17.: RESERVATÓRIO	98
FIGURA 4.18.: PARAFINAS NAS LINHAS	99
FIGURA 4.19.: VÁLVULA DE SEGURANÇA DE SUB-SUPERFÍCIE (DHSV)	100
FIGURA 4.20.: "GRAVEL PACK" – CONTENÇÃO DE AREIA	101
FIGURA 4.21.: COMPETIÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS	103
FIGURA 4.22.: COMPETIÇÃO ENTRE CAUSAS DE FALHAS AGRUPADAS	104
FIGURA 4.23.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM 2 PARÂMETROS	107
FIGURA 4.24.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM 3 PARÂMETROS	108
FIGURA 4.25.: AJUSTE DOS DADOS PARA A DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL COM 1 PARÂ- METRO	109
FIGURA 4.26.: AJUSTE DOS DADOS PARA A DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL COM 2 PARÂ- METROS	110
FIGURA 4.27.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO NORMAL	111
FIGURA 4.28.: AJUSTE DOS DADOS PARA DISTRIBUIÇÃO NORMAL	112
FIGURA 4.29.: CONFIABILIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO	115
FIGURA 4.30.: PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DO TEMPO	116
FIGURA 4.31.: FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (Pdf)	117
FIGURA 4.32.: FUNÇÃO TAXA DE FALHA	118
FIGURA 4.33.: SUPERFÍCIE DE CONTOURO	119
FIGURA 4.34.: SUPERFÍCIE DA FUNÇÃO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1.: TOTALIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS	62
TABELA 3.2.: TOTALIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS PRODUTORES	64
TABELA 3.3.: TOTALIZAÇÃO DAS INTERVENÇÕES EM POÇOS INJETORES	66
TABELA 4.1.: AJUSTE DOS PARÂMETROS E VALORES DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA	80
TABELA 4.2.: ESTIMATIVAS DAS PROBABILIDADES DE FALHAS	89
TABELA 4.3.: TAXA DE FALHAS PARA ALGUNS TEMPOS DE VIDA	90
TABELA 4.4.: EVOLUÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA	91
TABELA 4.5.: AGRUPAMENTO DAS CAUSAS DE FALHAS	102
TABELA 4.6.: COMPORTAMENTO DAS TAXAS DE FALHAS	105
TABELA 4.7.: AJUSTE DOS PARÂMETROS E VALORES DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA ..	113
TABELA 4.8.: ESTIMATIVAS DAS PROBABILIDADES DE FALHAS	121
TABELA 4.9.: TAXAS DE FALHAS PARA ALGUNS TEMPOS DE VIDA	122

RESUMO

A performance da manutenção da produção em campos de petróleo corresponde à maior parte do ciclo de vida dos projetos de desenvolvimento da produção. Envolve diferentes recursos e atividades, mas intervenção em poço é a operação associada mais importante e dispendiosa. Portanto, o planejamento e execução de intervenções são vitais para minimizar riscos e assegurar a rentabilidade desejada no desenvolvimento de campos de petróleo.

O presente estudo tem por objetivo propor uma metodologia, baseada na análise de dados, para auxiliar engenheiros na tarefa de planejar a manutenção de poços. Dados reais de um período de 12 anos de intervenções em poços petrolíferos, em águas profundas, de um grande projeto de desenvolvimento da produção da Bacia de Campos, Brasil, são coletados, catalogados e analisados. Vale a pena mencionar que, neste cenário particular em águas profundas, o banco de dados disponível para o estudo é único no gênero.

A atividade desta pesquisa compreende as seguintes fases: (1) Nove bancos de dados diferentes supriram dados, que são restritos a poços petrolíferos satélites “offshore” (submarinos), interligados a plataformas de produção, em lâmina de águas entre 500 e 1.500 metros. Os dados coletados geram um resumo, uma única base confiável de dados para trabalho, que é a base para as fases subseqüentes; (2) Uma análise preliminar é realizada, fornecendo as seguintes informações: número de intervenções, durações, causas e tipos de falhas; (3) Técnicas estatísticas e de engenharia de confiabilidade são utilizadas para obtenção do padrão das intervenções e alcance dos resultados desejados: modelagem das falhas, freqüências anuais, taxas de falha e tempo de sobrevivência dos poços; (4) Discussão dos principais resultados. Conclusões e sugestões para futuras pesquisas são apresentadas.

Observa-se que, apesar da existência de certa suspeita sobre sua confiabilidade, falha da Válvula de Segurança de Sub Superfície (DHSV) não é a principal razão para a intervenção em poços. A presente investigação concluiu que outras causas apresentam um histórico mais desfavorável. Também é possível concluir que o ajuste da distribuição de Weibull é mais adequado para a modelagem de falhas em poços que a premissa de taxa de falha constante. A análise dos dados também confirma que poços injetores de água são mais confiáveis, ou, em outras palavras, falham menos que poços produtores de óleo e que a vida característica dos poços continua em ascensão.

ABSTRACT

The maintenance of the production performance corresponds to the longest period of an oil field lifetime. It involves different resources and activities, but well intervention is the most important and expensive operation associated with. Therefore, intervention planning and execution are vital to minimize risks and assure the targeted profitability of oil field developments.

The present study focuses on proposing a methodology, based on data analysis, to help engineers while performing well maintenance plans. Real field data from a 12 year period of oil well interventions performed in a major production project in deep water, Campos Basin, Brazil, are collected, catalogued and analyzed. It is worth to mention that, in this particular deep water scenario, the database available for the study is unique.

The research activity comprises the following phases: (1) Nine different databases supplied data, which are restricted to satellite offshore oil wells connected to production platforms in water depths ranging from 500 to 1,500 meters. The collected data are converted into a single reliable database, which is the basis for the subsequent phases; (2) A first analysis is performed, providing the following information: number of interventions, durations, causes and types of failures; (3) Statistics and reliability techniques are used to obtain intervention patterns and calculate some important outputs, such as: failure modeling, annual frequencies, failure rates and the wells survival time; (4) Main results are discussed. Conclusions and suggestions for further developments are presented.

It is observed that, despite the existence of certain skepticism about their reliability, failure of Down Hole Safety Valves (DHSV) is not the main reason for well interventions.

The present investigation concluded that some other causes present a much more unfavorable record. It is also possible to conclude that the Weibull distribution adjustment is more suitable to well failure modeling than the usual assumption of constant failure rate. The data analysis also confirms that water injector wells are more reliable, or, in other words, fail less, than oil producers and that the wells characteristic life is rising.

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de pesquisa está relacionado à engenharia de confiabilidade, mais especificamente, à análise de dados de vida de poços petrolíferos em águas profundas na Bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro, Brasil.

A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema, equipamento ou objeto executar suas funções adequadamente por um período específico de tempo, dentro de certas condições operacionais. Ela também pode ser associada com operações bem sucedidas, com ausência de quebras ou falhas e com confiança no desempenho (Accioly, 1995).

Matematicamente, a confiabilidade de um sistema (ou componente) na época t , $R(t)$ é definida como $R(t) = P(T \geq t)$, onde T é a duração da vida do sistema e P a probabilidade. R é denominada função de confiabilidade. Por exemplo, caso para um determinado componente, $R(t_1) = 0,90$, isto significa que aproximadamente 90% destas peças, utilizadas sob dadas condições, estarão ainda em funcionamento na época t_1 (Meyer, 1984).

Esta área abrange vários estudos tais como modelos de falhas, testes acelerados, degradação e confiabilidade de sistemas entre outros. A área de modelos de falhas associada ao tempo de vida é o foco de interesse desta dissertação.

1.2 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo foi originado pela necessidade de se estabelecer uma metodologia para aperfeiçoar o planejamento da manutenção em poços de um grande campo de petróleo na Bacia de Campos, além de estabelecer diretrizes fundamentais para o planejamento de novos projetos de desenvolvimento da produção, quanto às intervenções em poços.

O desenvolvimento de um campo de petróleo abrange três fases: a exploração, o desenvolvimento da produção e a manutenção da produção. A primeira fase compreende desde os estudos de geofísica e avaliação geológica até a perfuração do primeiro poço exploratório, com a sonda de perfuração, que pode ser ou não o poço descobridor do campo. Este poço é então avaliado, ou seja, testado quanto aos aspectos técnicos e econômicos para avaliação da reserva de petróleo para posterior declaração de comercialidade. Depois, novos poços são perfurados, chamados de poços de delimitação da jazida, para adquirir mais informações quanto ao volume de petróleo presente na rocha reservatório e suas características para permitir a delimitação do campo. A segunda fase, o desenvolvimento da produção, pode ser definida como a implantação do projeto propriamente dita, englobando a perfuração e completação de todos os poços produtores de óleo e injetores de água. A completação corresponde ao conjunto de operações realizadas em um determinado poço, logo após a perfuração, para prepará-lo para a produção de óleo ou injeção de água. Também nesta fase são instalados as plataformas de produção e os sistemas de exportação de óleo e gás. A última fase, que se inicia paralelamente ao desenvolvimento da produção, compreende a manutenção da produção, ou seja, as intervenções em poços decorrentes de quaisquer falhas em seus equipamentos que venham a interromper as operações dos poços ou reduzir a produção de óleo ou injeção de água. Estas intervenções são realizadas com as sondas de intervenção ou completação de poços.

A etapa de manutenção da produção em campos de petróleo corresponde à maior parte do ciclo de vida dos projetos de desenvolvimento da produção. Esta se inicia, paralelamente à fase de implantação dos projetos e, geralmente, é relegada ao segundo plano ou subestimada no ciclo de vida de um campo.

O planejamento da manutenção / intervenção em poços petrolíferos, no que se refere aos riscos técnicos e econômicos, visando maximizar a rentabilidade do projeto, ainda não ocupa um lugar de destaque condizente com os altos valores investidos. Isto poderá inviabilizar o projeto no futuro ou induzir a uma perda de oportunidade de investimento, especialmente no que se refere aos Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica (EVTE) de novos projetos. Estes estudos englobam todas as fases do desenvolvimento de um campo de petróleo, desde a sua concepção até o abandono dos poços, levando-se em consideração todos os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de segurança que impactam a realização do projeto. Além disto, são formados por grupos de especialistas em suas respectivas áreas de atuação: geofísica, geologia, engenharia de reservatórios, engenharia de poços, engenharia de equipamentos, de processo e de produção.

O planejamento adequado, portanto, é fundamental para a correta avaliação da rentabilidade do projeto.

Os objetivos principais são identificar as causas de intervenção em poços, modelar as falhas e analisar o tempo de vida. De posse destes dados, discriminar os parâmetros que governam o sistema para prever o comportamento dos poços nos anos seguintes, levando-se em consideração a teoria da confiabilidade de sistemas.

1.3 ABRANGÊNCIA DO ESTUDO

Para esta pesquisa foram utilizados dados reais de um período de 12 anos de intervenções em poços petrolíferos, correspondendo ao período 03/1991 a 09/2003, de um projeto de desenvolvimento da produção de grande porte na Bacia de Campos. Contudo, como em águas profundas, no Brasil, o desenvolvimento dos campos produtores tem sido quase que, exclusivamente, através da completação molhada, a presente abordagem do problema está restrita a poços satélites “offshore” (submarinos) produtores de óleo e injetores de água, interligados às

plataformas de produção, em profundidade de água entre 500 e 1.500 metros. Além disso, a profundidade média dos poços é de cerca de 3.000 metros, sendo empregadas sete Unidades Estacionárias de Produção (UEP). A produção total corresponde, atualmente, a 570.000 barris de óleo e 8,4 milhões de metros cúbicos de gás por dia, com BSW (Basic Water and Sediments), que é em resumo a proporção de água em relação ao óleo produzido, de 12% e uma RGO (Razão Gás Óleo) de 90 m³/m³.

1.4 DADOS COLETADOS

A coleta de dados iniciou-se após consulta aos principais bancos de dados disponíveis, que são o NewBD e o SDC (Sistema de Dados de Completação), utilizados pela PETROBRAS. O NewBD, estruturado em Access – Microsoft, que historicamente, sempre foi usado como um banco de dados de grande porte, relativo às atividades de completação e intervenção em poços, era um protótipo de um módulo do antigo ADiP/SaD (Ambiente de Desenvolvimento da Intervenção em Poços / Sistema de Apoio a Decisão), atualmente desativado. Este protótipo é composto por um “front end” (NewBD) e dois bancos de dados relacionais (NewBDData e RAdat – dados de Relatórios de Anormalidades, estruturados em Access - Microsoft) onde estão arquivados todos os dados referentes ao período de agosto de 1991 a agosto de 1999. O NewBDData contém o registro de 2.870 intervenções em poços e 63.457 operações realizadas. O RAdat contempla 42.963 anormalidades / falhas provenientes dos seguintes bancos de dados: ROA (Relatório de Ocorrência de Anormalidades – primeira versão, também em Access), BDCA (Boletins Diários de Completação e Avaliação, estruturado em Word - Microsoft) e BDPerf (Boletins Diários de Perfuração, Sistema IBM). Até 1999, o processo de consistência dos dados do SDC, BDCA, BDPerf, além de outros externos à engenharia de poços, para atualizar o NewBDData e RAdat, durava 15 dias úteis. A tendência era a redução gradual deste tempo, mas devido a vários problemas de natureza técnica / estrutural o NewBDData deixou de ser utilizado no ano seguinte, em 2000. Portanto, o NewBD, até hoje é considerado um verdadeiro “data warehouse” consistente e confiável devido ao fato que todos os envolvidos trabalham com a mesma informação, exercendo ao mesmo tempo a função de verificadores (Miura *et al.*, 1999). O conceito de “data warehouse” é polêmico, mas tanto pesquisadores,

acadêmicos e especialistas concordam que estes são elaborados para fornecerem informações para a tomada de decisões, consultas específicas, índices de controle, decisões gerenciais e mineração de dados (Miura *et al.*, 1999).

O SDC, estruturado no antigo sistema da IBM em DB-2, contém os registros dos dados de completção, avaliação e intervenção em poços. A experiência demonstra que este é considerado mais confiável que o NewBD devido ao fato que o responsável pelo preenchimento das informações era o engenheiro executor das operações; enquanto que aquele era resultado de cruzamento / compilação de diversos dados sujeitos a incorreções inerentes ao seu processo de formação. O SDC abrange o período de 1991 a 2000, quando foi adotado o SEP (Sistema de Engenharia de Poço), que também substituiu o BDCA e o BDPerf. O SEP, estruturado em *Oracle*, era um sistema que englobava tanto os boletins diários de perfuração, avaliação, completção e relatórios de anormalidades / falhas. Mas, em 2002 este foi, gradativamente, substituído pelo DIMS (Drilling Information Management System), estruturado em *Oracle*, que hoje é o banco de dados padrão para perfuração, completção e intervenção em poços utilizados pela PETROBRAS.

Além destes bancos de dados, foram consultados os cronogramas de intervenção em poços abrangendo o período de 1995 a 2003. Este sistema utilizava o *MS Project* da Microsoft. Vale ressaltar que em muitos cronogramas, o objetivo da intervenção não era destacado. Isto obrigava à leitura completa de todas as tarefas dos cronogramas destes poços para poder identificar o motivo real da intervenção, a causa básica e a situação final dos poços. É bom salientar que o motivo real da intervenção, em muitos casos, difere do motivo pelo qual a sonda foi alocada àquele determinado poço. Isto significa que, nestas situações, o motivo real da intervenção só poderia ser descoberto após a reentrada da sonda no poço.

Os programas de intervenções em poços foram consultados conjuntamente com os bancos de dados supracitados para dirimir quaisquer dúvidas, discrepâncias ou lacunas que surgiram no decorrer do estudo. Estas lacunas são provenientes do cruzamento de bancos de dados que funcionam em bases ou estruturas diferentes, o que em alguns casos provocou perda de informações, problemas de leitura e de acesso, inerentes ao processo.

Dados coletados:

- População total crescente de 129 poços que sofreram 80 intervenções em 12 anos, sendo:
 - 86 poços produtores de óleo com 65 intervenções;
 - 43 poços injetores de água com 15 intervenções.

Relativos ao sistema poço:

- Identificação do poço;
- Tipo de poço: produtor de óleo ou injetor de água;
- Tipo de operação: limpeza, restauração, recompletação, remanejamento, ou abandono (provisório ou definitivo);
- Data de início da intervenção;
- Data de término da intervenção;
- Duração da intervenção, em dias;
- Identificação da sonda que realizou a intervenção;
- Motivo real da intervenção;
- Causa básica / detalhes operacionais em palavras-chave.

Os dados acima foram coletados nos bancos de dados supracitados e cruzados entre si, parte realizada por computador, em *Access*, e a outra realizada manualmente devido às lacunas e falhas nos bancos de dados existentes, por exemplo, erros de indexação no número de intervenções. Estes casos evidenciaram a necessidade da leitura obrigatória de todos os boletins e cronogramas de intervenção em poços com o objetivo de rastrear e prover continuidade do fluxo de informações. Isto foi efetivado para reproduzir, o mais fielmente possível, a realidade dos fatos.

A seguir, os resultados foram organizados em tabelas anuais com o número de intervenções, chamados de registros, e as causas que as originaram. Estas tabelas foram estruturadas em *Excel – Microsoft*, contendo filtros para facilitar as consultas.

De posse destes dados, será proposta uma metodologia para a aquisição de estimativas fundamentais ao planejamento da manutenção em poços petrolíferos.

O trabalho resume-se nas seguintes etapas:

- 1 - Análise dos bancos de dados disponíveis (NewBD, SDC, SEP, DIMS, BDCA, Cronogramas de Intervenções em Poços, Programas de Intervenções e SIP – Sistema de Informação da Produção) e geração de um resumo, uma única base de dados para trabalho;
- 2 – Aplicação de técnicas de engenharia de confiabilidade, estatísticas e probabilísticas à população de poços do projeto para obtenção de um padrão das intervenções e daí extrair os dados desejados: número de intervenções, durações, causas e tipos de falhas, modelagem das falhas, freqüências anuais, taxa de falhas, tempo de sobrevivência dos poços e tempo médio entre intervenções;
- 3 – Análise dos resultados;
- 4 – Conclusões;
- 5 – Sugestões para futuras pesquisas.

Os resultados podem ser usados em análises econômicas, previsão de manutenção e em estudos de confiabilidade.

Portanto, a importância deste estudo é a aplicação desta metodologia como alternativa para a redução da subjetividade que permeia nas decisões de investimento na manutenção da produção.

1.4.1 Definição do Sistema Poço

A descrição dos equipamentos que compõem um poço, assim como os tipos de poços, é fundamental para o estabelecimento das fronteiras do sistema poço e, com isso, distinguir as falhas relativas a ele das demais.

Neste estudo, os poços podem ser de dois tipos: produtor de óleo e injetor de água. Estes, resumidamente, têm o objetivo de “empurrar” ou direcionar o óleo para os poços produtores, favorecendo a manutenção da pressão da rocha reservatório a fim de aumentar o fator de recuperação da reserva.

O sistema poço em estudo tem os seguintes componentes, de cima para baixo:

- Linha de urgência c/ umbilical de controle;

- Árvore de Natal Molhada (ANM);
- Suspensor de coluna;
- Dispositivo de Segurança de Sub Superfície (DSSS ou DHSV – *Down Hole Safety Valve*);
- Coluna de Produção ou Injeção;
- Válvula de Gás *Lift* (VGL);
- Junta de expansão (TSR – *Tubing Seal Receptacle*) ou Âncora Selante;
- *Packer*;
- Reservatório;
- Sistema de contenção de areia ou *Gravel Pack*;

A seguir, uma breve descrição do papel de cada componente, segundo (Garcia, 1997):

- Linha de surgência com umbilical de controle: também chamada de *Flowline*, é uma linha flexível, com diâmetro de 2 a 6”, para transporte de fluidos. Interliga instalações submarinas de produção (poços, plataformas de produção, *manifolds*, etc.), trabalhando em regime estático e assentada sobre o leito marinho. Umbilical de controle é composto de linhas hidráulicas para comando do poço em produção ou injeção;
- Árvore de Natal Molhada (ANM): conjunto de válvulas gaveta, atuadas hidráulicamente, instalado na cabeça do poço submarino. Controla o fluxo de óleo e gás do poço. Possibilita outras operações necessárias à vida produtiva do poço. É instalada por um sonda de completação. É interligada a uma plataforma de produção ou a um *manifold* através de linha de surgência com umbilical de controle;
- BAP: Base Adaptadora de Produção: equipamento situado na cabeça de um poço submarino onde é acoplada a árvore de natal molhada (ANM);
- Suspensor de coluna: situado na cabeça do poço, sustenta o peso da coluna de produção ou injeção;
- Dispositivo de Segurança de Sub Superfície (DSSS ou DHSV – *Down Hole Safety Valve*): dispositivo de segurança, operado hidráulicamente da superfície e instalado na coluna de produção logo abaixo do fundo do mar. A função primordial

- é fechar a coluna, abaixo do fundo do mar em caso de dano severo na cabeça do poço que leve a vazamento de óleo ou gás pela árvore de natal molhada;
- BRV: *Back Retainer Valve*: válvula de injeção utilizada em poços injetores de água. Opera por diferencial de pressão, sem linha de controle até a superfície. Evita o refluxo de areia do reservatório para dentro do poço quando a injeção de água é interrompida;
 - Coluna de produção ou injeção: coluna de tubos que tem o papel de conduzir os fluidos produzidos até a árvore de natal. No caso de poço injetor, tem a função de permitir a injeção de água na rocha reservatório;
 - Válvula de Gás *Lift*: válvula que permite o acesso controlado e unidirecional do anular para a coluna;
 - Junta de expansão (TSR – *Tubing Seal Receptacle*) ou Âncora Selante: tem duas funções principais: absorver as dilatações da coluna devido a variações de temperatura e de viabilizar a técnica da Cauda de Produção, que permite retirar a parte da coluna acima do *packer*, deixando a parte inferior - cauda de produção ou injeção – intacta;
 - *Packer*: constitui em uma barreira de segurança referente ao anular do poço. Divide a coluna de produção ou injeção em parte superior e cauda de produção;
 - Reservatório: rocha porosa e permeável que contém os fluidos (óleo, gás e água) a uma determinada pressão e temperatura. No caso em estudo, trata-se de um arenito inconsolidado;
 - Sistema de contenção de areia ou *Gravel Pack*: conjunto formado por tubos telados e areia de granulometria uniforme ou cerâmica, instalado em frente à rocha reservatório, que exclui a produção de areia e finos da rocha inconsolidada, permitindo somente o fluxo de fluidos. Em alguns casos os poços horizontais podem ser equipados com tubos telados a poço aberto sem a utilização de areia de granulometria uniforme ou cerâmica.

Além disto, um poço pode ser classificado, quanto à trajetória, em: vertical, direcional e horizontal. Na figura 1.1 pode-se ter uma visualização auto-explicativa.

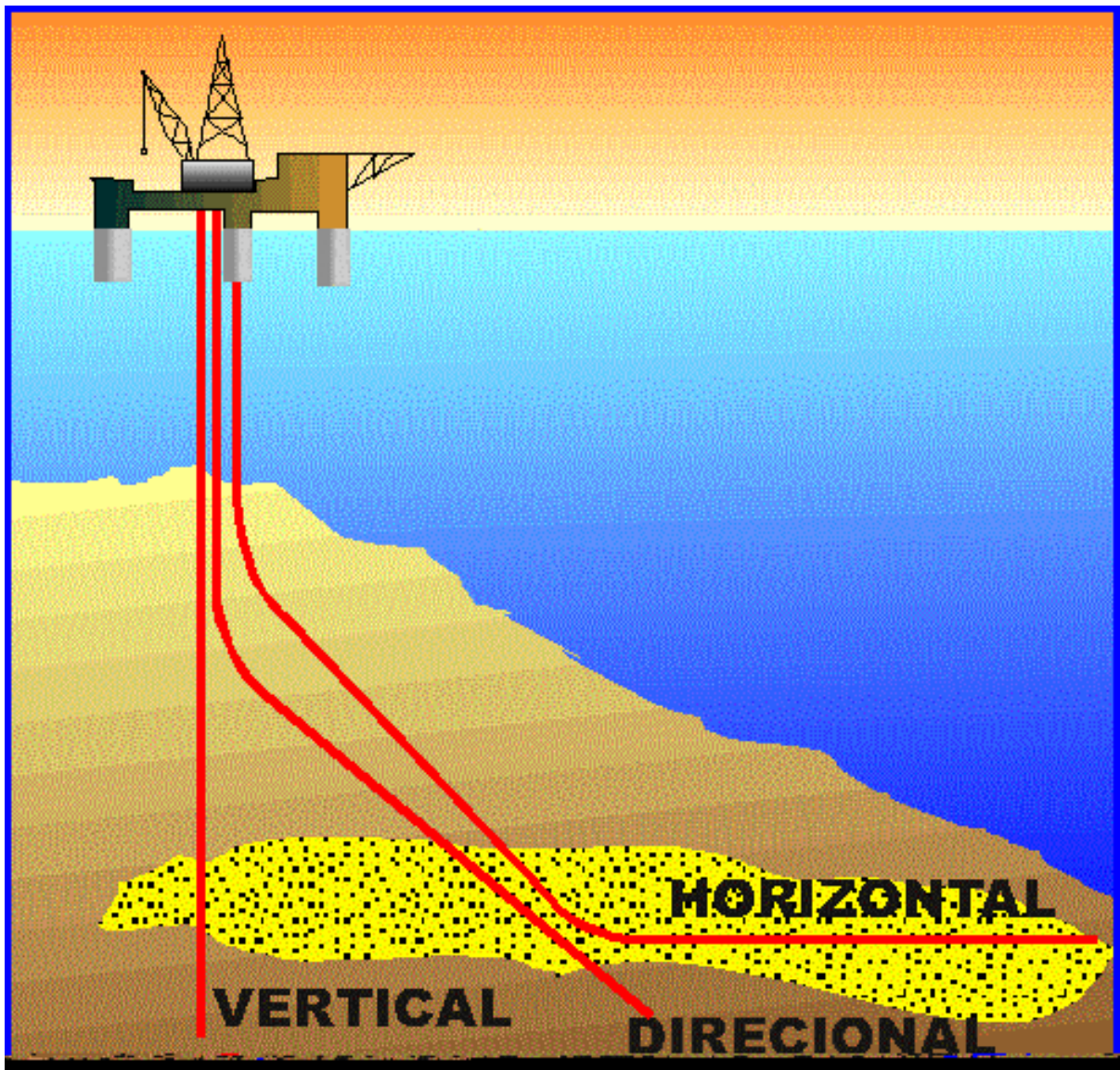


Figura 1.1: Tipos de poços quanto à trajetória. Fonte:(Garcia,1997).

A seguir temos esquemas, sem escala, de um poço produtor vertical submarino, figura 1.2, e de um poço injetor horizontal submarino típico em estudo, figura 1.3., segundo Garcia (1997).

POÇO PRODUTOR DE ÓLEO PLATAFORMA FLUTUANTE

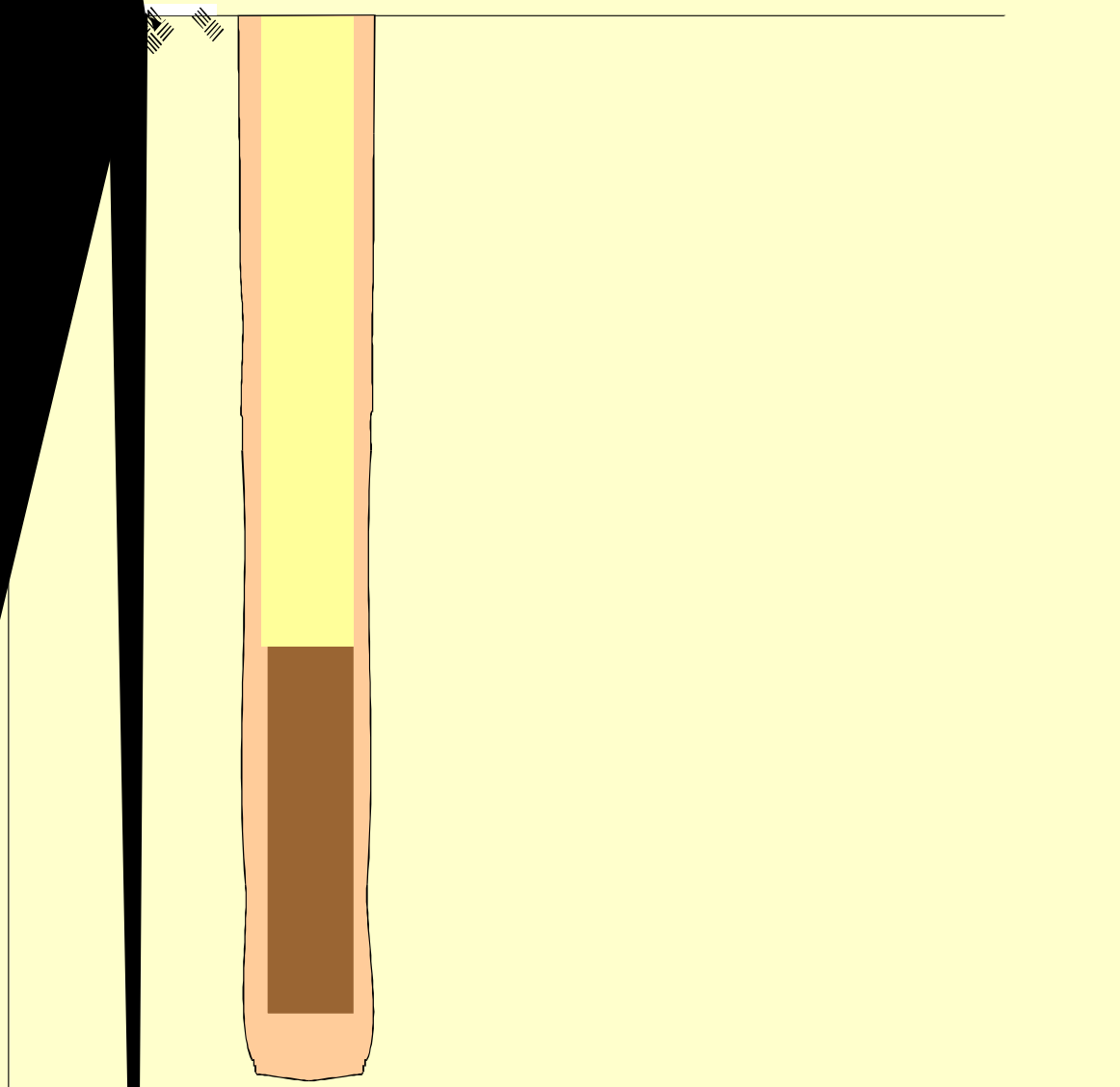


Figura 1.2 Esquema de poço produtor vertical submarino típico. Fonte: (Garcia, 1997).

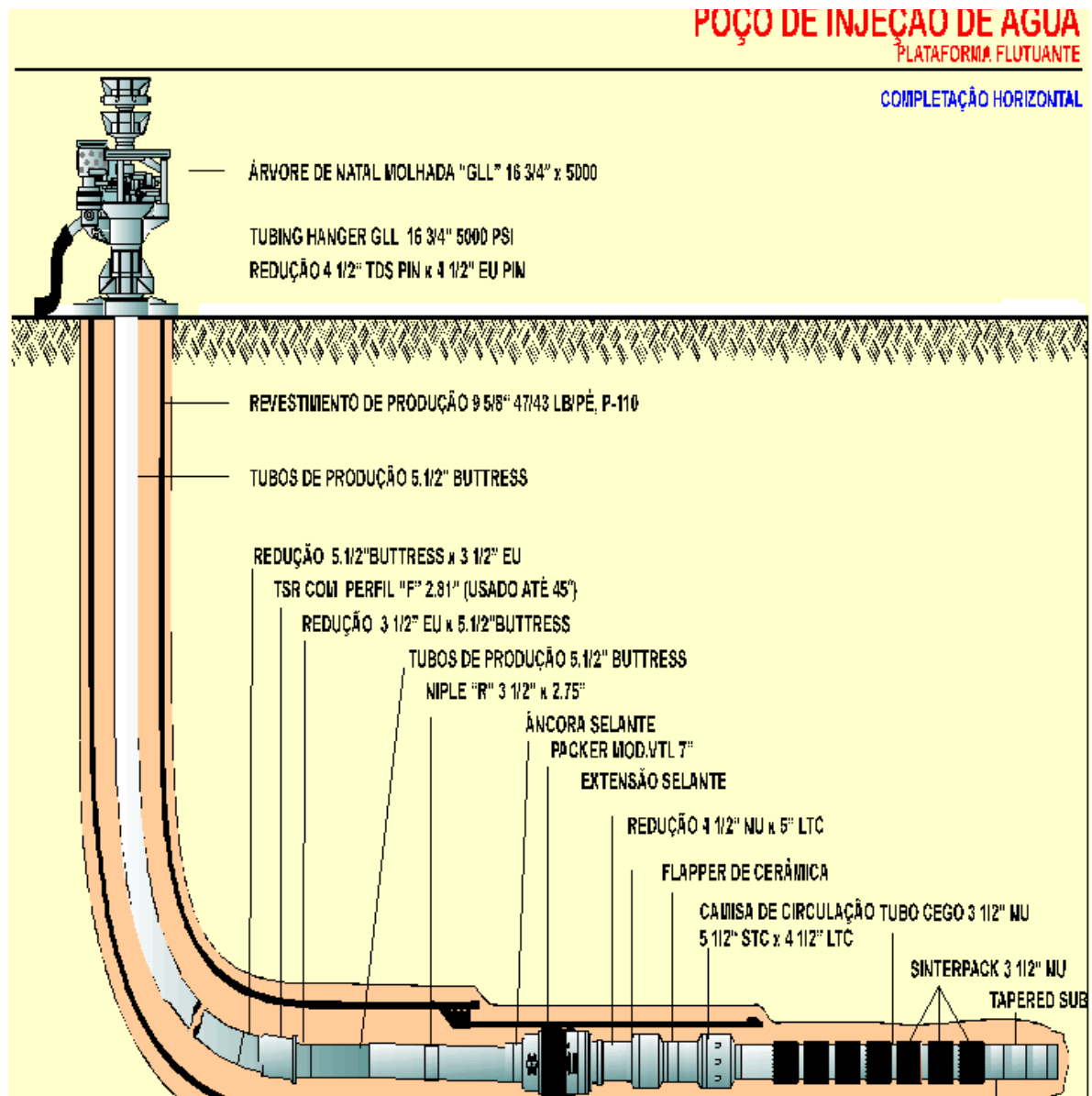


Figura 1.3: Esquema de poço injetor horizontal submarino típico. Fonte: (Garcia, 1997).

1.4.2 Operações de Manutenção em Poços

A vida de um poço petrolífero pode ser decomposta em quatro fases: a perfuração propriamente dita, a completação que é a fase em que o poço é equipado para a produção ou injeção, a manutenção e, finalmente, o abandono.

Segundo Garcia (1997), a manutenção da produção ou injeção é o conjunto de operações realizadas no poço, após sua completação inicial, visando corrigir problemas de modo a permitir que a produção ou a injeção de fluidos retorne ao nível normal ou operacional. As principais causas geradoras de intervenções são:

- Baixa produtividade;
- Produção excessiva de gás;
- Produção excessiva de água;
- Produção de areia;
- Falhas mecânicas em quaisquer componentes integrantes do poço;
- Formação de hidratos na árvore de natal ou na linha de surgência;
- Deposição de parafinas na linha de surgência;
- Remanejamento de poços (decisão gerencial);
- Abandono provisório ou definitivo.

No ambiente do poço, o hidrato pode-se formar quando há presença de gás e água submetidos a altas pressões e baixas temperaturas (4 graus centígrados). Tem o aspecto de um “bloco de gelo de cor branca” que, uma vez formado, obstrui parcial ou totalmente o fluxo de fluidos pela linha de surgência ou pela árvore de natal.

Neste ponto, cabe descrever os tipos de operações realizadas nos poços para a manutenção da produção ou injeção, na PETROBRAS, de acordo com Garcia (1997):

- Avaliação: conjunto de operações que objetivam o monitoramento do poço ou dos parâmetros da rocha reservatório;
- Restauração: conjunto de atividades que visam restabelecer as condições normais de fluxo da rocha reservatório para o poço, como, por exemplo, retirada do dano da rocha reservatório, correção de falhas mecânicas no

revestimento do poço ou na cimentação, redução da produção excessiva de água ou gás;

- Limpeza: conjunto de atividades executadas no interior do revestimento de produção visando substituir ou remover os equipamentos de sub superfície, objetivando um maior rendimento técnico e econômico. Resumidamente, quaisquer falhas em componentes do poço ou necessidade de substituição dos mesmos são causas geradoras de intervenções para limpeza;

- Mudança de Método de Elevação (MME): operação que tem o objetivo de substituir um determinado método de elevação de óleo por outro, como por exemplo, gás *lift* para Bombeio Centrífugo Submerso (BCS);

- Estimulação: conjunto de atividades que objetiva incrementar o Índice de Produtividade (IP) ou de Injetividade (II) de um poço em uma rocha reservatório;

- Abandono: operações que visam o abandono do poço. Pode ser Provisório, quando há previsão ou possibilidade de retorno ao poço no futuro ou Definitivo, quando o poço não será mais utilizado, ou seja, é a “morte” do poço.

Para um maior aprofundamento ou visão geral da engenharia de poço, consultar Thomaz *et al* (2000).

Como descrito anteriormente, a manutenção da produção ou injeção de um poço está diretamente relacionada à alocação de uma sonda de intervenção.

Tanto na literatura como na indústria do petróleo o termo técnico “intervenção” (em inglês, *intervention*) e *Workover*, coexistem assumindo, significados diferentes ou iguais dependendo das circunstâncias e de quem o utiliza. Por exemplo, pode-se usar a distinção nas seguintes categorias: (Thomson *et al.*, 2000):

- Completação: ocorre somente uma vez na vida do poço;

- *Workover*: atividades que geralmente demandam recuperação da coluna de produção ou injeção, que incluem o abandono de rocha reservatório selecionada e a recompletação para novos reservatórios atravessados pelo mesmo poço;

- Avaliação: testes de produção que ocorrem freqüentemente durante a vida do poço;
- Intervenção: operações que incluem todas as aquisições de dados para monitoramento da rocha reservatório, manutenção do poço, operações com arame e cabo elétrico, mudança de zona produtora ou injetora com equipamento de arame, etc.;
- Manutenção de Cabeça de Poço: operações geralmente realizadas como uma campanha em um determinado número de poços;
- Abandono: ocorre apenas uma vez durante a vida do poço.

No escopo desta dissertação, o termo genérico “intervenção” será utilizado para designar toda e qualquer operação realizada, com sonda, em um poço, após o início de sua vida, para restabelecer as condições normais de produção ou injeção para o qual foi projetado originalmente, considerando-se algum tipo de falha em componentes vitais ou essenciais. Quando o elemento mais crítico falha, o sistema todo falha. Esta, portanto, é a premissa básica que norteará o desenvolvimento deste trabalho.

1.4.3 Definição do Conceito de Falhas para o Sistema Poço

A definição de falha para o sistema em análise demanda alguns esclarecimentos. Qualquer equipamento ou sistema encontra seu desempenho ótimo de operação dentro de uma faixa de tolerância especificada pelo fabricante. A operação fora deste intervalo pode induzir queda no desempenho e também em falha do equipamento (Accioly, 1995).

No escopo deste trabalho, o sistema poço engloba todos os seus componentes, inclusive a linha de surgência que o interliga à plataforma de produção. É adotado um modo de falha pelo elo mais fraco. Aplicando isto ao conceito de um poço podemos observar que o mesmo funciona como um conjunto de elementos em série, em que a falha de um dos elementos implica na falha de todo o conjunto, o sistema poço. Além disso, uma queda de performance na produtividade ou na injetividade do sistema poço não representa uma falha. Somente a interrupção total do funcionamento do sistema, poço fechado, devido à

falha de um dos seus componentes vitais, que demanda uma sonda de intervenção, é considerado propriamente como falha.

Nos outros casos, os dados de tempo de vida do sistema poço são considerados como censurados, isto é, o sistema parou de funcionar por outros motivos que não a falha primária de qualquer componente vital para a plena operação do poço. Para exemplificar, podemos citar os casos previstos de remanejamento de poços entre plataformas de produção e que durante as intervenções ocorreram falhas de equipamentos; falhas decorrentes de falta de recursos apropriados para prosseguimento normal das operações, determinando sua interrupção; intervenções devido à implantação de programas de melhorias, como por exemplo, o Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional da PETROBRAS (PÉGASO) e comportamento “anormal” do reservatório devido às suas próprias incertezas.

1.4.4 Hipóteses Básicas Relativas aos Dados

Para a análise dos dados, uma premissa básica adotada é a independência entre o mecanismo de falhas e o modo como os dados foram censurados. Isto significa que os poços que sobreviverem até um tempo t_i , não devem ter os seus prognósticos alterados se eles sofrerem uma censura em t_j . Estatisticamente, isto equivale ao conceito de censura arbitrária (Accioly, 1995).

No caso de poços que sofreram intervenção e retornaram à normalidade, os seus comportamentos foram considerados como se fossem novos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO / MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA / CONFIABILIDADE

Segundo Lawless (1983), a maioria dos trabalhos estatísticos desenvolvidos referentes à teoria da confiabilidade foi aplicado ao tempo de vida de equipamentos e sistemas. Até 1935 o avanço nesta área foi tímido, excetuando-se os casos relacionados com a atuária (Accioly, 1995). Gumbel (1935) propôs uma família de distribuições paramétricas que poderiam ser aplicadas em modelos de tempo de vida, chamada de Valor Extremo. Em 1939, foi apresentada uma segunda família de distribuições paramétricas aplicável aos modelos de tempo de vida, muito difundida, futuramente, tanto no meio técnico como no acadêmico, que foi a chamada Distribuição de Weibull (Weibull, 1939).

Da década de 1950 até o final da década de 1960 os estudos de confiabilidade já tinham crescido significativamente em relevância na engenharia, com aplicação direta na indústria aeronáutica, nos programas espaciais, no lançamento de foguetes e satélites, no desenvolvimento de sistemas de posicionamento via satélite, entre outros. Os modelos mais utilizados eram baseados na distribuição exponencial devido sua simplicidade. Nesta época, o modelo de Weibull começou a ser amplamente utilizado e difundido no meio científico. Um

marco importante surgiu quando Kaplan e Méier (1958) lançaram um método não paramétrico para estimativa da curva de sobrevivência de equipamentos.

Já entre as décadas de 1970 até início da década de 1980, Mann *et al* (1974), Bain (1978), Lee (1980), Lawless (1982) e, finalmente, Nelson (1982) desenvolveram e apresentaram as análises de modelos uni-variados, isto é, modelos que não consideravam a influência de outras variáveis no tempo de vida para dados censurados ou não. As publicações de Nelson (1972, 1982) evidenciaram grandes avanços referentes a métodos gráficos de ajuste de distribuições, de fácil aplicação e de importância na análise de dados reais de campo.

Uma outra vertente desenvolvida com destaque corresponde aos testes de igualdade entre duas distribuições segundo as expansões do teste de Wilcoxon por Efron (1967) e os testes de escore por Peto e Peto (1972).

Gradativamente, a análise uni-variada revelou-se limitada para uma série de aplicações práticas já que desconsiderava a influência de outras variáveis no tempo de vida, com dados censurados ou não.

Quando a dependência dos tempos de vida em relação a outras variáveis é considerada, é chamada de análise de regressão dos tempos de vida. Nesta análise, os dois principais modelos são o de taxas proporcionais e o de envelhecimento acelerado (Accioly, 1995). O modelo de taxas proporcionais foi criado por Cox (1972), promovendo um grande avanço no estudo da análise de regressão. A partir dele, vários trabalhos foram publicados difundindo ainda mais a utilização desta análise, como por exemplo, os livros de Kalbfleisch e Prentice (1980), Lawless (1982), Cox e Oakes (1984) e Crowder *et al* (1991).

2.2 MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA NA ENGENHARIA DE POÇOS

O planejamento das intervenções é relevante em função do impacto na rentabilidade do projeto. A revisão bibliográfica mostra que o planejamento da manutenção ou intervenção em poços, no que se refere aos riscos técnicos e econômicos, visando-se maximizar a rentabilidade do projeto, ainda não ocupa um lugar de destaque condizente com os altos valores investidos. Isto poderá inviabilizar o projeto no futuro ou induzir uma perda de oportunidade de investimento.

Especificamente quanto à análise do tempo de vida de poços de petróleo, como um sistema, a revisão bibliográfica é pouco reveladora. Escassas publicações relevantes estão disponíveis, mesmo assim, contemplando partes ou algum equipamento específico em detrimento do sistema como um todo. O estudo das falhas em Bombas Centrífugas Submersas (BCS), em válvulas de segurança de sub superfície (DHSV), nos sistemas de bombeio mecânico, em diversos equipamentos de perfuração, completação e intervenção em poços como o BOP (Blow Out Preventer) ou nos tubos de produção, são exemplos característicos.

A seguir será descrita a evolução cronológica dos estudos e pesquisas referentes aos aspectos técnicos e econômicos quanto à intervenção em poços, incluindo as áreas de modelagem de falhas e análise de sobrevivência.

Rike (1972) foi um dos primeiros pesquisadores a indicar a necessidade de uma técnica fácil e rápida para a avaliação econômica em intervenção de poços. Ele concluiu, após pesquisas entre as companhias de petróleo e de consultoria, que a maioria, ou utilizava a simples "técnica do fluxo de caixa descontado" ou usava artifícios em favor de seu próprio "fluxo de caixa". Ele também notou que muitas operadoras mediam a viabilidade econômica em operações de manutenção em poços, simplesmente baseadas nos valores a serem despendidos no curto prazo. Não havia uma análise, mesmo que expedita, para a quantificação dos riscos envolvidos.

Patterson (1973) apresentou um modelo matemático em um artigo, com base no trabalho de Rike (1972), para a avaliação econômica de intervenção em poços incluindo o efeito do declínio da produção entre outros fatores.

Linqvist *et al* (1988) aplicou o modelo de taxas proporcionais de Cox (1972) a dados de falhas das principais válvulas de segurança de sub-superfície utilizadas em 26 campos de óleo e gás no Mar do Norte.

Patterson (1991) aplicou um modelo de Poisson a dados de falhas de bombas centrífugas submersas, desconsiderando-se efeitos de outras variáveis no tempo de vida destas. O modelo de Poisson proporciona uma distribuição probabilística para o número de falhas na unidade de tempo ou espaço escolhida, que depende apenas do número médio de falhas por unidade (Peters e Summers,

1978). É um modelo probabilístico adequado para um grande número de fenômenos aleatórios (Meyer, 1984).

Wiggins e Zhang (1993) desenvolveram um estudo sobre análise de risco em avaliação de intervenções no qual utilizaram o método de Monte Carlo, chegando às seguintes conclusões:

1. As oportunidades de intervenção de poços podem ser classificadas em três categorias, baseadas em seus relativos graus de incertezas: reparos de equipamentos em poços, produção (ambiente de poço) e intervenções para desenvolvimento do campo;
2. A Simulação de Monte Carlo é um método probabilístico que permite determinar todo o potencial resultado de um projeto e pode levar a uma melhoria substancial na avaliação de projetos em detrimento dos métodos determinísticos "mais apropriados" ou "mais indicados";
3. Um simples modelo econômico e a simulação de Monte Carlo podem melhorar a quantificação de risco na avaliação de *workover*, que é determinada de uma maneira subjetiva;
4. A simulação de Monte Carlo pode ser facilmente implementada em um ambiente de computador pessoal para avaliar, mais rigorosamente, as incertezas nas operações de *workover*. O modelo proposto é de simples implementação e pode levar a resultados confiáveis com um mínimo de esforço de programação.

Accioly e Martins (1999a) apresentaram informações e análises das intervenções no campo de Marlim e Albacora, na Bacia de Campos, Brasil, desde a perfuração do primeiro poço até a situação dos poços na data de 01/03/1999. Na primeira parte deste trabalho foi apresentada a análise do tempo de vida dos poços, compreendendo os tempos entre as intervenções e também o tempo de produção para os poços que não sofreram intervenção. Foi utilizado nesta análise o *software* comercial "Weibull +" e aplicados o método de Weibull para a interpretação destes dados. Depois foi apresentado o estudo de tempo de realização das atividades, ou

seja, a duração das operações para perfuração, completação e restauração dos poços. Segundo os autores, no caso do campo de Marlim, foram executadas 40 intervenções de restauração desde o início da produção em 1992, até a data do estudo. Este campo mostrou uma vida característica dos poços de 6,73 anos, significando que 63,2% dos poços iriam falhar dentro deste período e, conseqüentemente, 36,8% dos poços iriam produzir ou injetar sem problemas por mais de 6,73 anos. É sem dúvida uma vida característica alta comparada com a média dos outros campos da mesma bacia, devendo este desempenho, principalmente, a um grande número de poços que ainda não apresentaram falhas no período em avaliação. Na época, a maioria dos poços era jovem já que dos 44 poços em atividade, 26 ainda não haviam falhado. Os principais motivos apontados para causa das intervenções, neste caso, foram: falhas na Árvore de Natal Molhada (ANM) ou nas linhas: 64%; Reservatório (baixa produtividade, produção excessiva de água ou gás e produção de areia): 20% e Coluna de Produção (dano mecânico, vazamento ou furo em tubo de produção) e Válvula de Segurança de Sub Superfície (DHSV): 16%. As intervenções de restauração apresentaram como característica marcante uma ampla dispersão dos tempos necessários às realizações porque indicaram uma grande variedade de serviços executados, bem como os motivos das intervenções.

Como extensão, Accioly e Martins (1999b) incluíram os demais campos da Bacia de Campos em um estudo similar com os mesmos objetivos do estudo anterior. Ao final, apresentaram uma análise de tendência utilizando o *software* comercial "S-PLUS 4.5" para auxiliar nas estimativas dos tempos das intervenções que deveriam acontecer nos próximos anos e também uma análise das intervenções mais recentes à época em 1999.

Sawaryn *et al* (1999) utilizaram métodos estatísticos baseados na distribuição de Weibull e o modelo de confiabilidade "Bathtub" (gráfico da curva da banheira) foi aplicado aos dados referentes a 13 anos de operação em bombas centrífugas submersas para realizar estudos de confiabilidade.

D'Almeida (2000) apresentou um trabalho, com modelagem matemática, para a determinação da frota ótima de sondas de intervenção aplicando a teoria das Opções Reais.

Jorge (2000) apresentou, em sua tese de doutorado, aspectos relevantes para a indústria de petróleo referente à confiabilidade e análise de risco de BOP submarino (Blow Out Preventer), que é o equipamento de segurança utilizado pelas sondas de perfuração *offshore*, na cabeça de poço, em operações de perfuração e completação, com o objetivo de controlar o poço e evitar acidentes críticos. Neste trabalho, o autor utilizou dados de campo da costa brasileira e de bancos de dados do Mar do Norte para analisar e sugerir melhorias nos procedimentos relacionados ao conjunto BOP, principalmente no que se refere às práticas de testes e inspeções.

Accioly e Martins (2001) apontam para a importância do tratamento estatístico adequado dos dados históricos de intervenções de poços. Caso o campo seja novo, os autores sugerem a utilização de dados de campos "semelhantes", mas sempre respeitando as suas características. Este trabalho, tendo como base dados históricos de intervenções de poços em alguns campos de petróleo da Bacia de Campos, discute vários aspectos, demonstrando o uso das técnicas através de exemplos elucidativos, com o objetivo de reduzir a subjetividade no planejamento da intervenção de poços, além de ser um ponto de partida para o uso de técnicas ainda mais avançadas. Os resultados obtidos, segundo os autores, não devem ser utilizados no planejamento, servindo apenas como demonstração das técnicas disponíveis através de exemplos.

Hedrick *et al* (2003) apresentaram dados de falhas em 149 poços equipados com bombeio mecânico no campo terrestre de "Prentice - North East Unit", no estado do Texas, Estados Unidos. As falhas totais em poços foram agrupadas e quantificadas por componente (coluna de produção, bomba e haste de bombeio) em períodos anuais, de 1995 a 2002, demonstrando claramente a redução na taxa média de falhas mediante automação, gerenciamento por *software* especializado e, principalmente, equipes técnicas que valorizavam a análise diária dos parâmetros operacionais com a finalidade de antecipar possíveis falhas nos poços, a curto prazo. Além disto, foram divulgados os custos, substanciais, de falhas por poço.

A revisão bibliográfica demonstra que, em grande parte, os métodos tradicionais aplicados no planejamento da manutenção de poços petrolíferos até hoje, têm sido baseados na subjetividade, na busca de resultados em curto prazo sem um horizonte mínimo de planejamento, na experiência do campo (geralmente

adquirida após anos de trabalho mediante erros e acertos), na correlação de dados entre campos "similares", na simulação de Monte Carlo e, finalmente, em técnicas estatísticas e probabilísticas rudimentares que desconsideram a engenharia de confiabilidade. Além disso, vale ressaltar que o cenário de poços em águas profundas é recente na indústria do petróleo e concentrado em algumas regiões como a Bacia de Campos, Golfo do México, Mar do Norte e ultimamente na costa da África. Isto reflete diretamente na dificuldade de obtenção dos dados históricos. Os dados das falhas dos equipamentos do sistema poço em águas profundas no mundo são escassos ou em alguns casos insuficientes para suportar uma análise mais precisa. Neste contexto, os dados de campo, em águas profundas, utilizados para este trabalho de pesquisa revestem-se de especial importância para a indústria do petróleo.

2.3 CONCEITOS BÁSICOS

Alguns dos fundamentos da área da engenharia de confiabilidade e da modelagem de falhas são necessários ao presente desenvolvimento. Neste contexto, são apresentados a seguir os conceitos básicos necessários. Como estão fora do escopo desta dissertação, as provas com suas respectivas condições de contorno alusivas aos conceitos introduzidos a seguir podem ser encontrados nas referências bibliográficas.

2.3.1 Conceito de Confiabilidade

Os conceitos de confiabilidade e de taxa de falhas estão entre as mais importantes ferramentas necessárias para um estudo profundo dos "modelos de falhas". Como descrito anteriormente, a confiabilidade de um componente ou sistema é igual à probabilidade de que o componente ou sistema não venha a falhar durante um determinado intervalo de tempo $[0, t)$, ou de modo equivalente, confiabilidade é igual a probabilidade de que o componente ou sistema ainda esteja em operação no tempo t . Por exemplo, caso para um determinado componente

Em termos de função densidade de probabilidade (*fdp*) de T , considere a *fdp* f , então a função de confiabilidade é dada pela seguinte expressão:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds \quad (2.1)$$

Em termos da função densidade acumulada de T (tempo de vida), digamos F , teremos:

$$R(t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (2.2)$$

A avaliação da confiabilidade de um sistema, conhecendo a confiabilidade de seus componentes, poderá constituir-se em um problema de difícil solução. Como o objeto em estudo é o poço de petróleo, que é constituído de vários equipamentos interligados em série, focaremos a análise de falhas em componentes montados em série. Isto significa que, a fim de que o sistema funcione, todos os componentes deverão funcionar.

Caso n componentes que funcionem independentemente forem montados em série, e se o i -ésimo componente tiver confiabilidade $R_i(t)$, então, a confiabilidade do sistema completo, $R(t)$, será dada pela seguinte expressão:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot \dots \cdot R_n(t). \quad (2.3)$$

Isto significa que para um sistema formado de vários componentes independentes, em série, a confiabilidade do sistema é menor que a confiabilidade de quaisquer de suas partes (Meyer, 1984).

Analogamente, um sistema composto de vários componentes em paralelo, que funcionem independentemente, será de maior confiança que qualquer dos componentes (Meyer, 1984).

Matematicamente, pode-se enunciar o seguinte teorema: Caso n componentes, que funcionem independentemente, estiverem operando em paralelo,

e se o i -ésimo componente tiver confiabilidade $R_i(t)$, então a confiabilidade do sistema completo, $R(t)$, será dada pela seguinte expressão:

$$R(t) = 1 - [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \cdot [1 - R_3(t)] \dots [1 - R_n(t)] \quad (2.4)$$

Em muitas aplicações práticas, todos os componentes têm *igual* confiabilidade, isto é, $R_i(t) = r(t)$ para todo i . Neste caso, a expressão acima assume a seguinte forma:

$$R(t) = 1 - [1 - r(t)]^n \quad (2.5)$$

Enquanto a operação em série é freqüentemente obrigatória, ou seja, alguns componentes devem funcionar a fim de que o sistema funcione, emprega-se muitas vezes uma operação em paralelo de modo a aumentar a confiabilidade do sistema. Este é o chamado “Princípio da Redundância” bastante utilizado em sistemas vitais para evitar que uma falha primária em um elemento qualquer ocasione uma reação em cadeia trazendo conseqüências catastróficas ou imprevisíveis. Estes são, geralmente, sistemas que possuem um outro de reserva, conhecidos também como *back up* ou *standby*, que são ativados em caso de falha do sistema principal. Em muitas situações práticas, o segundo sistema ou reserva funciona se, e somente se, o primeiro sistema ou principal falhar. Neste caso, o segundo sistema entra em ação ou parte instantaneamente e funciona em substituição ao primeiro.

Um outro conceito importante na análise de confiabilidade é o de “Fator de Segurança”. Este pode ser explicado mediante um exemplo bem simples: suponha-se que o esforço de tração S aplicado a uma coluna de produção em um poço seja considerado uma variável aleatória contínua. Analogamente, a resistência à tração da coluna de produção do poço, R , pode também ser considerada uma variável aleatória contínua. Portanto, o fator de segurança, T , é definido como o quociente de R por S :

$$T = R / S \quad (2.6)$$

Caso R e S sejam variáveis aleatórias independentes, com funções densidades de probabilidade (fdp) g e h , respectivamente, então a fdp de T é dada pela seguinte expressão (Meyer, 1984):

$$f(t) = \int_0^{\infty} g(ts)h(s)sd s \quad (2.7)$$

Neste exemplo, a coluna de produção do poço sofrerá colapso se $S > R$, isto é, se $T < 1$. Logicamente, a probabilidade de colapso desta coluna, P_C é dada por (Meyer, 1984):

$$P_C = \int_0^1 f(t)dt \quad (2.8)$$

Como mencionado anteriormente, no presente estudo, o “sistema poço” é tratado de forma integrada com vários componentes operando em série. A falha de um componente vital significa a interrupção da operação de produção de óleo ou de injeção de água.

2.3.2 Conceito de Taxa de Falha

Além da função de confiabilidade R , outra função desempenha importante papel na descrição das características de falhas de um componente, que é a Taxa de Falha.

A descrição matemática do tempo de vida de um componente ou sistema requer a representação de uma distribuição dos tempos de falha. Caso tivéssemos dados completos acerca de uma determinada população homogênea a ser estudada, o ajuste de uma distribuição seria muito fácil. Mas, na prática, dispõe-se apenas de uma pequena amostra de uma população, considerada suficientemente grande, e que embutidos nestes dados coexistem vários tipos de causas geradoras de falhas do objeto em estudo (Accioly, 1995). Os dados de falha têm, geralmente, distribuição assimétrica e não normal. As distribuições assimétricas apresentam características bem diferentes nas suas extremidades direita e esquerda. A complexidade em se ajustar uma distribuição, nestes casos, reside no fato de se

dispor apenas de uma amostra que, geralmente, possui poucos dados nestas duas regiões.

Para contornar esta questão foi desenvolvido o conceito de taxa de falha. Seja $F(X)$ a função distribuição (*fd*) de uma variável aleatória X qualquer, que representa o tempo até falhar, ou duração da vida, e seja $f(x)$ a sua função densidade de probabilidade (*fdp*). Temos que:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(x)dx \quad (2.9)$$

A função taxa de falhas, denotada por $h(x)$, é definida como:

$$h(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \quad (2.10)$$

Considerando-se as particularidades do objeto em estudo, pode-se estabelecer uma forma funcional de $h(x)$. As funções $F(X)$ e $f(x)$ podem ser obtidas a partir do resultado anterior.

Neste cenário, um conceito importante é o da curva de sobrevivência, também chamada de “função de confiabilidade”. A probabilidade de um determinado indivíduo sobreviver até o tempo t é dada pela expressão (Accioly, 1995):

$$S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (2.11)$$

A taxa de falha é dependente em relação ao tempo. Baseado neste aspecto, pode-se ter três situações: uma taxa constante em relação ao tempo, uma taxa decrescente ou crescente com o tempo. Resumidamente, pode-se distinguir as três fases pelas quais um equipamento pode passar, a chamada curva da banheira (Figura 2.1). Nesta curva qualitativa, a fase inicial apresenta uma taxa de falha decrescente, denominada de mortalidade infantil (termo originado da área de atuária) ou de falhas prematuras. O intervalo seguinte representa uma estabilização da taxa de falha, isto é, ela permanece constante em um determinado nível caracterizando a ocorrência de falhas aleatórias. O último trecho apresenta um

aumento considerável da taxa de falha devido à degradação do equipamento pelo uso, correspondendo à fase de envelhecimento onde o mesmo atinge o final da vida útil, embora possa operar por um longo tempo.

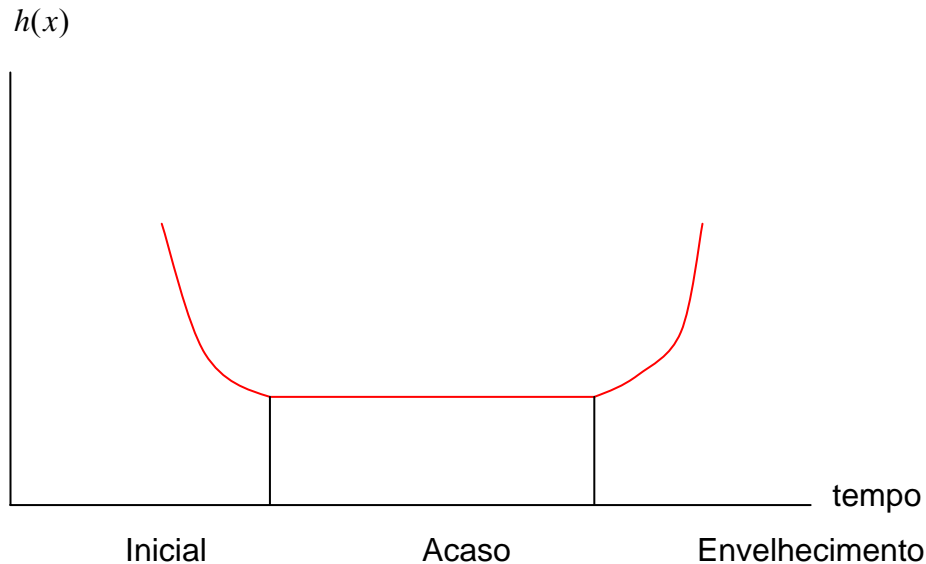


Figura 2.1 – Curva da banheira

Esta é uma curva qualitativa que representa, de forma genérica, o comportamento de um equipamento. Na prática, estas fases não se comportam de maneira equilibrada, sempre prevalecendo uma ou duas fases. A literatura registra que, no caso de bombas, válvulas, compressores, enfim, máquinas e motores passam de uma fase de mortalidade infantil ou de falhas prematuras diretamente para o envelhecimento. Por outro lado, os *softwares* apresentam exclusivamente uma taxa decrescente de falhas. Portanto, a tarefa de ajustar uma função adequada aos dados de falhas encontrados na vida real, é complexa (Accioly, 1995).

2.3.3 Conceito de Censura

Este conceito é de suma importância para o tratamento adequado de dados de falhas, para se evitar o “mascaramento” dos resultados. Vamos recorrer a um exemplo para facilitar o entendimento: vamos supor que seremos responsáveis por um teste de ensaio para recebimento de um determinado lote de motores, para os

quais selecionamos, aleatoriamente, 40 unidades do mesmo. Certamente, como não poderemos esperar que todos os motores falhem, é necessário pré-definir um tempo T de duração para realizar o ensaio. Expirado este tempo, o normal é que alguns destes motores ainda continuem funcionando. Portanto, como seria uma perda de informação valiosa o descarte destes dados, surgiu a necessidade do conceito de dados censurados. A seguir serão descritos os principais tipos de censura.

2.3.3.1 Tipos de Censura

Na estatística, existem três tipos principais de dados censurados: os censurados à direita, os censurados à esquerda e os de censura aleatória.

Os dados de censura à direita são classificados em dois tipos:

- Tipo I: utilizado quando um teste é realizado até um tempo pré-definido T , de forma que somente saberemos o tempo de vida daqueles que falharam até aquele instante de tempo;

- Tipo II: utilizado quando em um teste com n componentes, pré-fixamos um número r de itens cujas falhas serão catalogadas.

Os dados de censura à esquerda correspondem àqueles em que sabemos que a falha ocorreu antes de um instante de tempo pré-fixado, isto é, os elementos estudados só são examinados em instantes de tempos pré-determinados. Desta forma, somente conheceremos o tempo exato de falha dos elementos que falharem nestes instantes.

Finalmente, os dados de censura aleatória são utilizados ao se lidar com dados de campo e em pesquisas médicas. Logicamente, os elementos de interesse entram no estudo aleatoriamente, e da mesma forma, se o estudo tiver um tempo de duração pré-fixado, também os tempos de censura serão aleatórios.

Como este trabalho utiliza dados de campo, este tipo de censura será largamente aplicado, já que existe uma independência clara entre o mecanismo de falha e o de censura; tem-se o chamado modelo de censura aleatória independente.

2.4 ANÁLISE NÃO PARAMÉTRICA

A análise não paramétrica permite analisar dados de vida de componentes ou sistemas sem a necessidade de assumir, antecipadamente, uma determinada distribuição.

Esta análise revela algumas vantagens e desvantagens. A habilidade em se analisar dados sem adotar uma determinada distribuição de tempo de vida evita a ocorrência de grandes erros potenciais ao assumir premissas incorretas acerca da distribuição. Por outro lado, os intervalos de confiança associados à análise não paramétrica são geralmente mais largos que aqueles calculados mediante análise paramétrica. Adicionalmente, previsões fora do intervalo de observações não são possíveis. Em determinados casos, pesquisadores da área recomendam que qualquer banco de dados de vida deveria ser primeiramente submetido a uma análise não paramétrica antes de se adotar uma determinada distribuição de tempo de vida. Entretanto, a literatura registra que é possível comparar diversas distribuições entre si, mediante *software* específico, para obtermos a distribuição de tempos de vida que melhor se ajusta aos dados. Esta última forma será amplamente utilizada neste trabalho.

Há vários métodos para se conduzir uma análise não paramétrica, incluindo o método de Kaplan & Meier (1958), atuarial simples e métodos atuariais padronizados. Um método para atribuir um intervalo de confiança aos resultados destas técnicas de análises não paramétricas também pode ser desenvolvido.

A base da análise não paramétrica para dados de vida é, de forma empírica, a função de distribuição acumulada, dada pela seguinte expressão:

$$\hat{F}(t) = \frac{\text{observações} \leq t}{n} \quad (2.12)$$

onde:

n = número total de unidades

t = tempo

$\hat{F}(t)$ = estimativa de $F(t)$

O estimador de Kaplan e Méier (1958), também conhecido como o estimador limite do produto, pode ser utilizado para calcular valores para dados de confiabilidade não paramétricos com múltiplas falhas e censuras. A equação do estimador é expressa da seguinte forma:

$$\hat{R}(t_i) = \prod_{j=1}^i \frac{n_j - r_j}{n_j}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2.13)$$

onde:

m = número total de pontos

n = número total de unidades

A variável n_i é definida como:

$$n_i = n - \sum_{j=0}^{i-1} s_j - \sum_{j=0}^{i-1} r_j, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.14)$$

onde:

r_j = número de falhas no j -ésimo grupo de dados

s_j = número de censuras no j -ésimo grupo de dados

Pode-se observar que a estimativa de confiabilidade é somente calculada para tempos nos quais ocorreram uma ou mais falhas. Para facilitar o cálculo do valor de n_j nos valores de tempo que tenham falhas e censuras, assume-se que as censuras ocorrem logo depois das falhas, de tal modo que as unidades censuradas são consideradas ainda em operação e incluídas na contagem de n_j .

Neste trabalho, a análise paramétrica para distribuições de tempo de vida será amplamente utilizada.

2.5 MODELOS DE TEMPO DE VIDA: DISTRIBUIÇÕES

Felizmente, existem na literatura diversas outras formas mais práticas e de fácil aplicação para a estimativa da curva de sobrevivência. Estas são denominadas

de distribuições de probabilidades, que podem ser ajustadas aos modelos de tempo de vida de componentes ou de sistemas. Contrariamente ao item anterior, neste caso a estimativa será determinada mediante um modelo paramétrico.

A engenharia de confiabilidade apresenta várias distribuições que descrevem o comportamento de uma população ou de sistemas com suas probabilidades de falhas. Os principais modelos de distribuições são descritos a seguir. Como suplemento, outros modelos de distribuições disponíveis na literatura são descritos no apêndice.

2.5.1 Distribuição Exponencial 1

Esta distribuição possui apenas um parâmetro, que é a taxa de falha, denominado por λ .

Segundo Meyer (1984), uma das mais importantes leis de falhas é aquela cuja duração até falhar é descrita pela distribuição exponencial. Esta distribuição descreve sistemas com taxa de falhas constante. Esta característica fundamental implica na ausência de memória, isto é, não importa o tempo de operação do equipamento, este irá sempre falhar devido ao acaso. Uma consequência imediata desta hipótese é que a função densidade de probabilidade (*fdp*) associada à duração até falhar T , seja dada por,

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (2.15)$$

onde t é o tempo e $\lambda > 0$ é a taxa de falha. A origem do parâmetro λ advém da própria origem da distribuição exponencial. Logo, o tempo de espera entre as chegadas sucessivas de um processo de Poisson, com parâmetro λ , tem distribuição exponencial. Baseada na equação (2.15), pode-se concluir que a confiabilidade é dada por (Lafraia, 2001):

$$C(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.16)$$

A hipótese de taxa de falhas constante pode também significar que, depois que o componente ou sistema estiver em uso, sua probabilidade de falhar não tenha

sido alterada. Expondo de maneira menos rigorosa, não existe efeito de “desgaste” quando o modelo exponencial é empregado. Como descrito anteriormente, podemos afirmar que a lei de falhas exponencial admite que a probabilidade de falhar seja independente do que se tenha passado. Isto quer dizer que, enquanto o componente ou sistema ainda estiver funcionando ele será “como se fosse novo”.

Para muitos tipos de componentes, a hipótese que condiz com a lei de falhas exponencial é, não somente sugestiva intuitivamente, mas de fato é confirmada pela evidência empírica. Por exemplo, é bastante razoável admitir-se que um fusível seja “tão bom quanto novo”, enquanto estiver ainda funcionando. Isto é, se o fusível não estiver fundido, estará praticamente em estado de novo, nem um rolamento, por exemplo, sofrerá alterações significativas devido a desgaste. Portanto, nestas situações, a lei de falhas exponencial representa um modelo apropriado ao estudo do comportamento de falhas de um componente ou sistema. Contudo, cabe aqui uma palavra de advertência: quando um sistema for submetido a esforço continuado ou prolongado durante um período de tempo, haverá, obviamente, uma deterioração gradativa e por isto, um outro modelo deve ser empregado em substituição ao exponencial.

Neste ponto, é muito importante compreender que, no caso exponencial pode-se identificar tempo de operação, a partir de um valor inicial definido arbitrariamente, com idade de operação. Isto porque neste caso, um componente ou sistema que não tenha falhado é tão bom quanto um novo, e, por isso, seu comportamento de falhas durante qualquer período particular depende somente da extensão deste período e não do seu passado. É importante destacar que se admitirmos uma lei de falha “não exponencial” (tal como a lei normal ou uma das distribuições que serão descritas a seguir), o passado exerce influência sobre o desempenho do componente ou sistema. Por esta razão, enquanto podemos definir T como o tempo em serviço até falhar para o caso exponencial, devemos definir T como a duração total da vida até falhar para os casos “não exponenciais”.

Na prática, as aplicações da distribuição exponencial são empregadas nas seguintes situações, segundo Lafraia (2001):

- Falhas de equipamentos com mais de 200 componentes sujeitos a mais de três manutenções corretivas ou preventivas;

- Sistemas complexos não redundantes;
- Sistemas complexos contendo componentes com taxas de falhas independentes;
- Sistemas com dados de falhas indicando causas muito heterogêneas;
- Sistemas de vários componentes, com substituições antes de falhas devido à manutenção preventiva.

2.5.2 Distribuição Exponencial 2

Esta é a distribuição exponencial com dois parâmetros, denominados por λ , que é a taxa de falha e por γ , que é o parâmetro de localização. Este parâmetro, caso positivo, desloca, graficamente, o início da distribuição em uma distância γ a partir da direita da origem. Isto significa que as falhas devidas ao acaso começam a ocorrer somente após um período de tempo de operação γ , não podendo ocorrer antes (Reliasoft, 2000).

A função densidade de probabilidade (*fdp*) associada à duração até falhar T , é dada por,

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}, \quad t > 0 \quad (2.17)$$

onde t é o tempo, $\lambda > 0$ é a taxa de falha e γ o parâmetro de localização.

Esta distribuição é um caso mais geral da distribuição exponencial com um parâmetro, bastando, para isso, considerar o parâmetro γ como sendo zero.

2.5.3 Distribuição de Weibull 2

Esta é a distribuição de Weibull com dois parâmetros. Segundo Meyer (1984), a distribuição de Weibull representa um modelo apropriado para uma lei de falhas, sempre que o sistema for composto de vários componentes e a falha seja essencialmente devida à “mais grave” imperfeição, irregularidade ou defeito “fatal” dentre um grande número de imperfeições do sistema. Justamente por esta característica marcante, ela é bem adequada ao tratamento de falhas em poços petrolíferos, por exemplo. Também, utilizando uma distribuição de Weibull,

poderemos obter tanto uma taxa de falhas crescente, como uma decrescente, pela simples escolha adequada do parâmetro β , que será definido em breve. Caso este parâmetro seja igual a 1, ou seja, $\beta=1$, obteremos uma distribuição exponencial. Isto quer dizer que a distribuição exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull. Esta é uma das distribuições mais utilizadas na análise de falhas. A sua função densidade de probabilidade (*fdp*) tem a seguinte forma:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right], \quad t \geq 0 \quad (2.18)$$

onde $\beta > 0$ é o fator de forma e $\eta > 0$ é o fator de escala. Esta é a densidade para a distribuição de Weibull com dois parâmetros. Caso $\beta = 1$ a distribuição de Weibull se transforma em uma exponencial. Quando $\beta < 1$ a distribuição apresenta taxa de falha decrescente e quando $\beta > 1$ passamos a ter uma taxa de falha crescente com o tempo.

A função distribuição de Weibull possui três parâmetros para determinar a probabilidade de falha, confiabilidade e taxa instantânea ou função de risco. Além disto, há casos especiais da função de Weibull: valores particulares dos parâmetros desta função transformam a expressão original em expressões de outras distribuições geralmente utilizadas para descrever os modos de falha (Lafraia, 2001).

2.5.4 Distribuição Weibull 3

Esta é a distribuição de Weibull com três parâmetros. Além dos parâmetros da distribuição anterior, possui o parâmetro de localização denominado γ .

A função densidade de probabilidade (*fdp*) tem a seguinte forma:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (2.19)$$

onde $f(t) \geq 0, t \geq 0$ ou $\gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty$, sendo η o parâmetro de escala,, β o parâmetro de forma e γ o parâmetro de localização (Reliasoft, 2000).

Esta distribuição, em linhas gerais, possui as mesmas características básicas da distribuição Weibull com dois parâmetros.

2.5.5 Distribuição Normal

A distribuição normal, conhecida também como distribuição de Gauss é, comumente, a mais utilizada para análises gerais de confiabilidade: tempos para falhas de equipamentos eletrônicos simples, de componentes mecânicos, de equipamentos ou de sistemas (Reliasoft, 2000).

A função densidade de probabilidade (*fdp*) tem a seguinte forma:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.20)$$

sendo $f(t) \geq 0$, $-\infty < t < \infty$ e $\sigma > 0$, onde μ é a média dos tempos normais até a falha e σ o desvio padrão dos tempos até a falha. É, portanto, uma distribuição com dois parâmetros.

Conforme Lafraia (2001), uma população que se ajuste à distribuição normal tem variações simetricamente dispostas ao redor da média. Uma razão importante para a aplicação desta distribuição advém do fato de que quando um valor está sujeito a muitas variações que se somam, independentemente de como estas variações são distribuídas, o resultado da distribuição composta é normalmente distribuído. Isto é demonstrado pelo teorema do valor central.

Para ilustrar a razão da grande importância desta distribuição, Meyer (1984) afirma que a distribuição normal serve como uma excelente aproximação para uma grande classe de distribuições, que têm enorme importância prática. Além disto, esta distribuição apresenta algumas propriedades matemáticas muito desejáveis, que permitem concluir importantes resultados teóricos.

2.5.6 Distribuição Lognormal

Segundo Lafraia (2001), esta é uma distribuição mais versátil que a distribuição normal, porque tem uma forma mais variada, o que possibilita melhor

ajuste da população. Um exemplo prático é a análise de falhas em componentes sujeitos ao desgaste. Uma distribuição normal com $\ln t$ como variável independente reduz-se a uma distribuição lognormal. Dentre as suas diversas aplicações, uma que se destaca é a determinação do tempo médio para manutenção de componentes ou sistemas mecânicos. Por isto, esta distribuição ainda é bastante utilizada na modelagem de tempos de vida. A sua função densidade de probabilidade é dada pela expressão:

$$f(t) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma t} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad t > 0 \quad (2.21)$$

Isto, considerando que o logaritmo dos tempos de vida seguem uma distribuição normal, isto é, a variável tempo de vida T é distribuída de forma lognormal com média μ e variância σ^2 .

Esta distribuição apresenta uma grande desvantagem que dificulta a sua aplicação referente à sua taxa de falha. Ela apresenta valor zero quando o tempo t se aproxima de zero ou infinito, o que torna o ajuste trabalhoso na maioria dos casos.

A distinção entre os diversos modelos de distribuições pode ser realizada a partir de testes de hipóteses, o que foge ao escopo desta pesquisa. Maiores detalhes acerca da teoria referente à distinção entre os modelos de distribuições supracitados são encontrados no apêndice, no final deste trabalho.

Na prática, a distinção entre os vários modelos paramétricos e sua escolha adequada é realizada mediante utilização de *software* específico, o que será empregado neste trabalho.

2.6 INFERÊNCIA PARA MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA

Uma vez apresentadas as distribuições de probabilidade mais utilizadas e os modelos geralmente aplicados para modelar os tempos de falha, a próxima fase é a estimação de seus parâmetros. A questão é como inferir, partindo dos dados de

falhas disponíveis, quais são os estimadores de parâmetros que definem univocamente a distribuição adotada.

Um bom estimador de parâmetros deve possuir as seguintes propriedades, segundo Accioly (1995):

1. Ausência de tendências;
2. Eficiência;
3. Consistência;
4. Suficiência.

Um estimador é classificado como não tendencioso quando seu valor esperado é igual ao valor do parâmetro a ser estimado.

Quando dois estimadores são ditos não tendenciosos, aquele que possuir menor variação para um determinado tamanho de amostra, é o mais apropriado. Isto se justifica porque a sua estimativa terá maior probabilidade de se aproximar do valor real do parâmetro da população. Esta é a propriedade chamada eficiência.

A consistência é definida como a propriedade que uma amostra possui de que a tendência de a estimativa estar próxima do parâmetro é maior quanto maior for a amostra utilizada.

A suficiência se caracteriza quando a estimativa contiver toda a informação da amostra sobre o parâmetro de interesse.

Os métodos da máxima verossimilhança e de regressão em X e em Y são os principais métodos para a obtenção de estimadores. Neste trabalho será utilizado o método da máxima verossimilhança. Segundo Spanos (1986), este método possui as propriedades descritas acima dentre outras, de forma que algumas delas são válidas apenas assintoticamente.

2.6.1 Método da Máxima Verossimilhança

Do ponto de vista estatístico, o método da máxima verossimilhança é, com algumas exceções, considerado como o método mais robusto para a estimação de parâmetros.

A idéia básica deste método é a obtenção dos valores mais prováveis dos parâmetros, para uma dada distribuição, que melhor descrevem os dados, sendo expresso da seguinte forma: seja X_1, X_2, \dots, X_n uma amostra aleatória de tamanho n retirada de uma população com função densidade de probabilidade dada por $f_X(X; \theta)$, onde θ é um parâmetro desconhecido. A função de verossimilhança desta amostra é a conjunção das densidades destas n variáveis aleatórias e é uma função do parâmetro desconhecido.

A função de verossimilhança é, matematicamente, definida da seguinte forma:

$$L = \prod_{i=1}^n f_{x_i}(x_i; \theta) \quad (2.22)$$

O estimador de máxima verossimilhança, chamado de EMV, de θ , $\hat{\theta}$, é o valor de θ que maximiza L , ou seja, o logaritmo de L . Na prática o EMV de θ é encontrado a partir da expressão abaixo, para os valores da amostra:

$$\frac{d \log L}{d \theta} = 0 \quad (2.23)$$

Caso os representantes da amostra, X_i , sejam retirados de uma função de densidade do tipo $f_X(X; \theta_1, \dots, \theta_k)$, a função de verossimilhança será dada por:

$$L = \prod_{i=1}^n f_{x_i}(x_i; \theta_1, \dots, \theta_k) \quad (2.24)$$

Logicamente, a obtenção das estimativas é realizada de forma análoga à exposta acima.

As estimativas de máxima verossimilhança possuem outras propriedades além das descritas anteriormente. Segundo Mann *et al* (1974), sob determinadas condições, a função de verossimilhança relativa a θ tem uma solução que converge em probabilidade para o valor verdadeiro de θ , à medida que $n \rightarrow \infty$. Conforme

Accioly (1995), esta solução é assintoticamente normal e é uma estimativa assintoticamente eficiente de θ .

A distribuição dos estimadores de máxima verossimilhança, em muitos casos, é difícil de ser encontrada. Por outro lado, a sua distribuição para grandes amostras pode ser obtida com maior facilidade. Isto é, justamente, devido à distribuição assintótica dos estimadores de máxima verossimilhança.

2.6.2 Teoria dos Estimadores de Máxima Verossimilhança

Neste ponto, convém discutir a teoria dos estimadores de máxima verossimilhança para grandes amostras.

A função de verossimilhança foi definida, anteriormente, (equação 2.22) pela seguinte expressão:

$$L = \prod_{i=1}^n f_{x_i}(x_i; \theta).$$

Os estimadores de máxima verossimilhança, ou valores dos parâmetros de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$, são obtidos maximizando L . No entanto, maximizando $\log L(\theta)$, é bem mais fácil de se trabalhar que L . Nota-se também que $\log L(\theta)$ também é maximizada para a estimativa de θ , sendo $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ um vetor de parâmetros desconhecidos assumindo valores dentro de um conjunto denominado de Ω . Conforme descrito anteriormente, a estimativa de máxima verossimilhança pode ser encontrada mediante as chamadas equações de verossimilhança, denominada por $U_i(\theta) = 0$ ($i = 1, \dots, k$), onde:

$$U_i(\theta) = \frac{\partial \log L(\theta)}{\partial \theta_i} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.25)$$

Os $U_i(\theta)$'s são denominados de escores e o vetor $k \times 1$ $U(\theta) = [U_1(\theta), \dots, U_k(\theta)]$ é chamado de vetor escore (Accioly, 1995).

De acordo com Cox e Hinkley (1974), este vetor escore é definido como a soma de variáveis aleatórias identicamente e independentemente distribuídas já que $\log L(\theta) = \sum \log f(x_i; \theta)$, e que, sob condições razoáveis de regularidade, tende assintoticamente para a distribuição normal. O vetor $U(\theta)$ apresenta média zero e matriz de covariância, denominada de $I(\theta)$, possuindo termos da seguinte forma:

$$I_{ij}(\theta) = E\left(\frac{-\partial^2 \log L(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}\right) \quad i, j = 1, \dots, k. \quad (2.26)$$

A matriz $I(\theta)$ é denominada de matriz esperada de informações de Fisher. Mediante condições moderadas de regularidade, a matriz de informações observada I_0 , contendo elementos da seguinte forma,

$$I_{o,ij} = \frac{-\partial^2 \log L(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \Big|_{\theta = \hat{\theta}} \quad (2.27)$$

é um estimador consistente de $I(\theta)$.

2.6.3 Máxima Verossimilhança Aplicada a Dados Censurados

A situação mais comum encontrada na prática é o caso de dados censurados à direita ou dados suspensos. No caso de dados de tempo de vida, estes dados englobam os elementos que não falharam em um determinado tempo quando o teste foi interrompido.

Para uma melhor compreensão quanto à máxima verossimilhança aplicada a dados censurados, vamos considerar uma amostra com observações censuradas à direita. Nesta situação específica, não podemos utilizar a função densidade de probabilidade para estes dados censurados já que a única informação que dispomos sobre os mesmos é que eles sobreviveram até um determinado tempo $t \geq T$. Por esta razão, podemos separar as observações em duas classes independentes: a primeira, chamada de U , engloba as observações não censuradas e a segunda, denominada de C , as censuradas. Baseado nesta premissa, a função de verossimilhança pode ser definida da seguinte forma:

$$L(\theta) = \left\{ \prod_{i \in U} f(t_i; \theta) \right\} \left\{ \prod_{i \in C} S(t_i; \theta) \right\}. \quad (2.28)$$

Isto equivale a substituir a função densidade de probabilidade pela função de sobrevivência. Analogamente, no caso de observações censuradas à esquerda, esta seria substituída pela função distribuição.

No caso de censura aleatória, Accioly (1995) demonstra, de forma bem simples, como encontrar a função de verossimilhança: consideremos que dispomos de um conjunto de observações, nas quais denominaremos de T um tempo de vida e L um tempo censurado. Do ponto de vista estatístico, estas observações são variáveis randômicas contínuas e independentes, possuindo funções de sobrevivência iguais a $S(t)$ e $G(t)$, respectivamente. Seja o par (T_i, L_i) , $i = 1, \dots, n$, independente e vamos definir $t_i = \text{mín}(T_i, L_i)$ e $\delta_i = 1$ se $T_i \leq L_i$ e $\delta_i = 0$ quando $T_i > L_i$. Os dados obtidos a partir das observações compõem-se de pares do tipo (t_i, δ_i) , $i = 1, \dots, n$. A função densidade de probabilidade de (t_i, δ_i) será facilmente encontrada se $f(t)$ e $g(t)$ forem as densidades de probabilidade de T_i e L_i , porque temos que,

$$\Pr(t_i = t, \delta_i = 0) = \Pr(L_i = t, T_i > L_i) = g(t) S(t) \quad (2.29)$$

$$\Pr(t_i = t, \delta_i = 1) = \Pr(T_i = t, T_i \leq L_i) = f(t) G(t) \quad (2.30)$$

Combinando estas equações em uma única expressão, temos que:

$$\begin{aligned} \Pr(t_i = t, \delta_i) &= [f(t) G(t)]^{\delta_i} [g(t) S(t)]^{1-\delta_i} \\ &= \left\{ \prod_{i=1}^n G(t_i)^{\delta_i} g(t_i)^{1-\delta_i} \right\} \left\{ \prod_{i=1}^n f(t_i)^{\delta_i} S(t_i)^{1-\delta_i} \right\} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Caso $G(t)$ e $g(t)$ não envolvam parâmetros de interesse, então o primeiro membro da equação acima pode ser cancelado. Desta maneira, a função de verossimilhança assume a seguinte forma:

$$L \propto \prod_{i=1}^n f(t_i)^{\delta_i} S(t_i)^{1-\delta_i} \quad (2.32)$$

Esta expressão apresenta a mesma forma da função de verossimilhança encontrada para a censura à direita do tipo I. Na verdade, este tipo de censura pode ser considerado um caso especial da censura randômica independente, Accioly (1995).

Neste trabalho, as funções de verossimilhança são fundamentadas neste tipo de censura e na teoria de verossimilhança para grandes amostras, já que fornece um resultado mais estável e próximo da realidade.

Além disso, como o método da máxima verossimilhança é de difícil manuseio, de forma analítica, esta tarefa será realizada por *software* específico, o “Weibull ++ Versão 6.0”.

2.6.4 Testes de Hipóteses

Segundo Meyer (1984), outra maneira para tratar o problema de se fazer uma afirmação sobre um parâmetro desconhecido, associado a uma distribuição de probabilidade, é a aplicação de testes de hipóteses. Em vez de procurar-se uma estimativa do parâmetro, freqüentemente poderá ser conveniente admitir um valor hipotético para ele e, depois, utilizar os dados disponíveis para confirmar ou rejeitar esse valor hipotético.

Em testes de hipóteses, utilizaremos a seguinte notação: H_0 é denominada a hipótese da nulidade ou hipótese básica e H_1 a hipótese alternativa.

Conforme Accioly (1995), o principal problema em se testar hipóteses sobre um determinado modelo, está relacionado à obtenção de testes estatísticos cuja distribuição seja conhecida sob ambas as hipóteses, H_0 e sua alternativa H_1 e, que independam do parâmetro conhecido θ . A primeira parte desta questão pode ser

contornada sob certas condições. A segunda demandará a utilização da teoria assintótica.

Ao analisar o problema quando estabelecemos uma estimativa $\hat{\theta}$ para o parâmetro θ , deparamos com as seguintes questões: Quão “boa” é a estimativa? Que propriedades desejáveis ela deve apresentar? Podemos formular perguntas semelhantes acerca do teste que elaboramos: Quão “bom” é o teste? Que propriedades ele deve apresentar? Como compará-lo com outro teste alternativo proposto?

Para responder, adequadamente, a estas perguntas, deveremos, primeiramente, entender que nenhuma solução existe, no sentido geral, para o problema que foi colocado. Isto nos remete à analogia com o problema de estimação de parâmetros: não esperamos que a estimativa $\hat{\theta}$ seja igual a θ ; apenas esperamos que ela esteja próxima de θ . Neste ponto, Meyer (1984) afirma que um teste não nos conduzirá sempre à decisão certa, mas um bom teste nos conduzirá à decisão correta na maioria das vezes.

Admitimos, até este ponto, que a variável em estudo apresentasse uma determinada distribuição, isto é, como resolver o problema de possuir um parâmetro desconhecido, associado a uma distribuição de probabilidade. No entanto, pode acontecer que não estejamos nem sequer seguros sobre a forma geral da distribuição básica. Isto significa que não temos pista alguma acerca da provável distribuição: Os dados disponíveis fundamentam a existência de qual distribuição? São os dados consistentes com a hipótese de que a variável em estudo seja exponencialmente distribuída? Estas questões são típicas de uma grande classe de problemas que surgem na prática. Existem, na literatura, algumas técnicas estatísticas pelas quais estes problemas podem ser analisados. Uma das mais utilizadas é o chamado teste de aderência, que é uma técnica para testar a hipótese de que uma variável tenha uma certa distribuição especificada.

Por não ser o objetivo deste trabalho, não será abordada uma teoria geral dos testes de hipóteses ou testes estatísticos, que existe e é muito extensa. Desta forma, no decorrer deste trabalho, quando necessário, o teste proposto será intuitivamente justificável. Nenhuma tentativa será elaborada para indicar que um

determinado teste seja, em algum sentido, o melhor. A exposição da teoria geral de testes estatísticos, testes de hipóteses e testes de aderência pode ser encontrada em Derman & Klein (1959) e em Meyer (1984).

3. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

3.1 INTRODUÇÃO

Para esta pesquisa foram coletados dados reais de um período de 12 anos de intervenções em poços petrolíferos, correspondendo ao período de 03/1991, início da produção, a 09/2003, de um projeto de desenvolvimento da produção de grande porte na Bacia de Campos, Brasil.

3.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Conforme descrito no item 1.3, a abordagem desta pesquisa está restrita a poços satélites submarinos produtores de óleo e injetores de água, interligados às plataformas de produção, em profundidade de água entre 500 e 1.500 metros. Além disso, a profundidade média dos poços é de cerca de 3.000 metros. Os poços produtores de óleo e injetores de água, quanto à sua trajetória, são subdivididos em poços verticais, direcionais e horizontais. O sistema de produção compreende sete Unidades Estacionárias de Produção (UEP), nas quais os referidos poços estão interligados.

3.3 BANCOS DE DADOS EXISTENTES

Todas as intervenções realizadas nos poços geraram dados para diversos bancos de dados com estruturas e bases diferentes.

Nenhum banco de dado, sozinho, contém informações completas sobre as intervenções em poços. Isto demonstra que a existência de uma fonte única e confiável de dados é desejável como ponto de partida para quaisquer análises quanto às falhas em poços. Não sendo único o banco de dados, o trabalho de extrair e consolidar os dados necessários à análise demandou um tempo extraordinariamente longo. Este tempo foi tão longo que acabou por inviabilizar o emprego dos dados de uma forma sistematizada. Para se ter uma idéia foram consumidos nove meses para a obtenção dos dados, considerando, obviamente, o teste de consistência.

Os bancos de dados disponíveis, utilizados pela PETROBRAS, para arquivar os registros das intervenções em poços, e consultados para esta pesquisa, são descritos a seguir.

3.3.1 NewBD

O NewBD é um banco de dados que foi estruturado em Access – Microsoft tendo sido utilizado no período de agosto de 1991 a agosto de 1999. Contudo, apesar de desativado em 1999, os dados cadastrados ainda podem ser consultados. A finalidade principal era congrega todas as informações dos históricos das perfurações, completações e intervenções em poços. Este banco de dados permitia a pesquisa através de filtros e por palavras-chave. Historicamente, sempre foi considerado um banco de dados de grande porte relativo aos poços, já que era alimentado com as informações históricas registradas nos Boletins Diários de Avaliação e Completação (BDCA) e nos Boletins Diários de Perfuração (BDPerf). Posteriormente, passou a ser um protótipo de um módulo do ADiP/SaD (Ambiente de Desenvolvimento da Intervenção em Poços / Sistema de Apoio a Decisão), atualmente desativado, que também agrupava registros de todas as operações em poços. Este protótipo foi composto por um “front end” (NewBD) e dois bancos de dados relacionais (NewBData e RAdat – dados de Relatórios de Anormalidades,

estruturados em Access - Microsoft) onde estão arquivados todos os dados referentes ao período de agosto de 1991 a agosto de 1999. O NewBData contém o registro de 2.870 intervenções em poços e 63.457 operações realizadas. O RAdata contempla 42.963 anormalidades / falhas provenientes dos seguintes bancos de dados: ROA, Relatório de Ocorrência de Anormalidades – primeira versão, também em Access, BDCA, estruturado em Word - Microsoft e BDPerf, estruturado no Sistema IBM. Até 1999, o processo de consistência dos dados do SDC, BDCA, BDPerf, além de outros externos à engenharia de poços para atualizar o NewBData e RAdata durava 15 dias úteis. A tendência era a redução gradual deste tempo, mas devido a vários problemas de natureza técnica / estrutural o NewBData estacionou no tempo no ano seguinte, em 2000. Portanto, o NewBD, até hoje é considerado um banco de dados verdadeiro, consistente e confiável devido ao fato que todos os envolvidos trabalham com a mesma informação, exercendo ao mesmo tempo a função de verificadores (Miura *et al.*, 1999). Tanto pesquisadores, acadêmicos e especialistas concordam que bancos de dados deste tipo são elaborados para fornecerem informações para a tomada de decisões, consultas específicas, índices de controle, decisões gerenciais e mineração de dados (Miura *et al.*, 1999).

3.3.2 SDC

O SDC, Sistema de Dados de Completação, estruturado no antigo Sistema da IBM em DB-2, contém os registros dos dados de completação, avaliação e intervenção em poços. Este não englobava os dados referentes às perfurações dos poços. A experiência demonstra que este é considerado mais confiável que o NewBD devido ao fato que o responsável pelo preenchimento das informações era o engenheiro executor das operações; enquanto que aquele era resultado de cruzamento / compilação de diversos dados sujeitos a incorreções inerentes ao seu processo de formação. O SDC abrange o período de 1991 a 2000, quando foi adotado o SEP, que também substituiu o BDCA e o BDPerf.

3.3.3 SEP

O SEP, Sistema de Engenharia de Poço, criado pela PETROBRAS, estruturado em Oracle, era um sistema que englobava os boletins diários de

perfuração, avaliação, completação e relatórios de anormalidades / falhas internas e externas ao poço. Este sistema, que vigorou de 2000 a 2002, era alimentado diretamente pelos executores das operações, ou seja, engenheiros e técnicos especializados em suas respectivas áreas de atuação. As correções, as eventuais inconsistências quanto ao banco de dados, migração de dados e a confiabilidade era verificada por uma equipe de suporte e apoio ao usuário. Este sistema, além de possuir ferramentas para minimizar erros de preenchimento por parte dos usuários, imprimia uma certa padronização às informações.

3.3.4 DIMS

O DIMS, “Drilling Information Management System”, desenvolvido pela Landmark, também estruturado em *Oracle*, que hoje é o banco de dados padrão para perfuração, completação e intervenção em poços utilizados pela PETROBRAS, foi adotado em 2002, em um processo gradativo, em substituição ao SEP.

Assim como o seu antecessor, este sistema também é alimentado pelos executores, contando com uma equipe de apoio ao usuário para o esclarecimento de dúvidas, resolução de inconsistências, depuração de dados e gerenciamento do sistema utilizando ferramentas de autodiagnóstico. Além disto, possui ferramentas que reduzem erros de preenchimento de dados, padronizando as informações. Como foi implantado recentemente, ainda está em fase de testes e treinamento.

3.3.5 BDCA

O BDCA, Boletim Diário de Completação e Avaliação, era um formulário elaborado para o preenchimento manual das informações. Era um boletim que relatava os detalhes operacionais do dia a dia. Este foi o precursor, a base de dados primária relativa aos poços para a formação dos demais bancos de dados. A partir de 1994, este formulário passou a ser estruturado em *Word* – Microsoft, mas, ainda preenchido manualmente. Neste ponto, melhorou-se apenas o aspecto, a sua forma. A padronização das informações registradas era precária, baseando-se em manuais de preenchimento do BDCA, que sugeria uma linguagem apropriada a ser seguida pelo executor das operações, o engenheiro responsável. Os dados coletados para

este boletim eram fortemente textuais com pouca codificação de operações, conforme Miura *et al.* (1999).

Estes boletins eram agrupados, diariamente, segundo as operações de completação e intervenção em cada poço, em uma pasta arquivo para formar a chamada “Pasta do Poço”. Além disto, algumas informações foram “micro-filmadas”. Este sistema vigorou até 2000 quando foi substituído pelo SEP.

3.3.6 CRONOGRAMA

Os cronogramas de completação e intervenção em poços são estruturados em *MS Project* da Microsoft. Adotado em 1995, vigora até hoje, em paralelo ao DIMS. Para este trabalho, foram consultados os cronogramas de intervenção em poços abrangendo o período de 1995 a 2003.

A sua finalidade principal era a de servir como um cronograma, propriamente dito, das operações. Mas, devido a alguns recursos disponíveis neste *software*, estes cronogramas passaram a englobar também as funções de programa de completação e de intervenção, além de registrar as anormalidades ocorridas, nas chamadas *task notes*. A alimentação e atualização deste banco de dados também eram manuais, seguindo uma padronização especificada.

Vale ressaltar que em muitos cronogramas, o objetivo da intervenção não era destacado. Isto obrigava à leitura completa de todas as tarefas dos cronogramas destes poços para poder identificar o motivo real da intervenção, a causa básica e a situação final dos poços. É bom salientar que o motivo real da intervenção, em muitos casos, difere do motivo pelo qual a sonda foi alocada àquele determinado poço. Isto significa que, nestas situações, o motivo real da intervenção só poderia ser descoberto após a reentrada da sonda no poço.

3.3.7 PROGRAMA DE INTERVENÇÃO

O programa de intervenção em poços compreende a programação, o projeto detalhado, a ser seguido pela equipe de intervenção sob a responsabilidade do

engenheiro da sonda. São estruturados em *Word* – Microsoft, vigorando até o presente momento.

Este programa era resultado de trabalho em equipe baseado nas informações contidas no histórico do poço e na situação atual, quando da ocorrência de uma falha que paralisava a operação de produção ou injeção.

Além disto, contém o objetivo da intervenção, de forma bem clara. Vale ressaltar que este objetivo é o aparente, ou seja, aquele que levou à alocação de uma sonda para realizar o reparo. Em vários casos registrados, o objetivo real é diferente, isto é, só é sabido, com certeza, quando a sonda acessa o poço. Esta distinção é importante porque evita erros quanto à classificação das falhas ocorridas. Neste trabalho, as falhas dos poços foram classificadas segundo o motivo real de cada intervenção.

3.3.8 ADiP/SaD

O ADiP/SaD, Ambiente de Desenvolvimento da Intervenção em Poços / Sistema de Apoio a Decisão, agrupava os registros de todas as operações em poços. Originou-se em 1992, passando a operar em 1999 e desativado em 2000 quando foi substituído pelo SEP.

Conforme Miura *et al.* (1999), este banco de dado foi concebido para fornecer informações para a tomada de decisões, consultas específicas, índices de controle, decisões gerenciais e mineração de dados. De fato, um dos produtos deste sistema seria disponibilizar dados para o cálculo do MTBF (tempo médio entre falhas) de equipamento e poço, além de identificar componentes falhos nos equipamentos.

Conforme exposto anteriormente, este sistema, em resumo, era oriundo da compilação do NewBD e SDC.

3.3.9 SIP

O SIP, Sistema de Informação da Produção, estruturado em *Oracle* em ambiente corporativo, de âmbito nacional, congrega todas as informações relativas à

produção e injeção dos poços. Além disto, contém informações de desempenho operacional, testes, reservas, estado de c

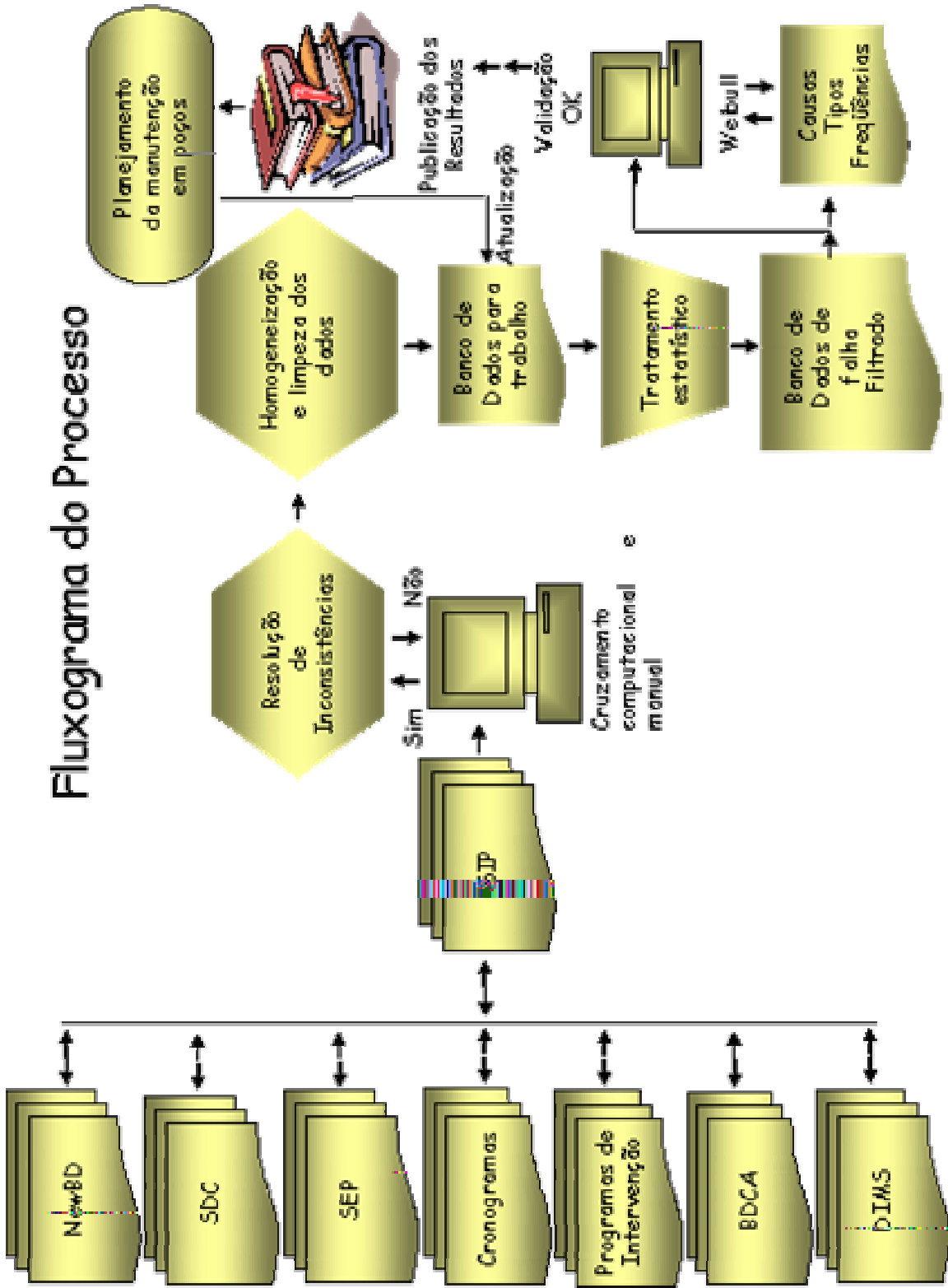


Figura 3.1 – Fluxograma do processo de coleta e tratamento dos dados

3.4 DADOS COLETADOS

Conforme descritos no capítulo 1, os dados coletados são os seguintes:

- População total, com crescimento anual, de 129 poços que sofreram 80 intervenções no período de 12 anos, sendo:
 - 86 poços produtores de óleo com 65 intervenções;
 - 43 poços injetores de água com 15 intervenções.

Para o estudo e modelagem das falhas, considera-se um poço como um sistema em série composto por vários equipamentos interligados entre si em que uma falha em qualquer elemento acarreta a interrupção da produção de óleo ou injeção de água.

Desta forma, os dados coletados relativos ao sistema poço foram os seguintes:

- Identificação do poço;
- Tipo de poço: produtor de óleo ou injetor de água;
- Tipo de operação: limpeza, restauração, recompletação, remanejamento, ou abandono (provisório ou definitivo);
- Data de início da intervenção;
- Data de término da intervenção;
- Duração da intervenção, em dias;
- Identificação da sonda que realizou a intervenção;
- Motivo real da intervenção;
- Causa básica / detalhes operacionais em palavras-chaves.

Além disto, todos os dados de início e fim de operação de produção ou injeção dos poços foram catalogados e tabulados. As datas de início de operação correspondem aos nascimentos dos poços e as datas de fim de operação, à morte ou abandono definitivo dos mesmos. Como o campo em estudo é relativamente novo, somente alguns poços sofreram morte ou abandono definitivo. A importância da tabulação destas datas reside no fato de as mesmas serem o ponto de partida

para o cálculo da taxa de sobrevivência dos poços, de forma estratificada, ou seja, divididos por classes ou grupos.

A estes dados foram adicionados os dados dos poços que nunca sofreram intervenção. Além disso, também foram incluídas as informações de tempo de vida até o momento da análise, o que se configura como dados censurados à direita.

Estes dados não serão divulgados, em sua íntegra, por se tratar de informações confidenciais de propriedade da PETROBRAS.

3.5 METODOLOGIA DA COLETA DE DADOS

Os dados acima foram coletados nos bancos de dados supracitados e cruzados entre si, parte realizada por computador, em Access, e a outra realizada manualmente devido às lacunas e falhas nos bancos de dados existentes, por exemplo, erros de indexação no número de intervenções. Estes casos evidenciaram a necessidade da leitura obrigatória de todos os boletins, BDCA, e cronogramas de intervenção em poços com o objetivo de rastrear e prover a continuidade do fluxo de informações. Isto foi efetivado para reproduzir, o mais fielmente possível, a realidade dos fatos. Os cronogramas e os programas de intervenção foram consultados conjuntamente com os bancos de dados supracitados para dirimir quaisquer dúvidas, discrepâncias ou lacunas que surgiram no decorrer do estudo. Estas lacunas são provenientes do cruzamento de bancos de dados que funcionam em bases ou estruturas diferentes, o que em alguns casos provocou perda de informações, problemas de leitura e de acesso, inerentes ao processo.

A seguir, os resultados foram organizados em tabelas anuais com o número de intervenções, chamados de registros, e as causas reais que as originaram. Estas tabelas foram estruturadas em Excel – Microsoft, contendo filtros para facilitar as consultas, além de serem um resumo, uma única base de dados confiável para trabalho.

Todos os procedimentos supracitados foram implementados porque a homogeneidade dos dados históricos de intervenções é de suma importância para a validade das conclusões. Por este motivo, a uniformidade dos dados foi preservada

conciliando os conhecimentos das técnicas estatísticas com a experiência técnica em engenharia de poços.

Um outro aspecto considerado neste trabalho foi a “limpeza” dos dados. Isto porque os dados em sua forma bruta englobam diversos detalhes e imprecisões que precisam ser discriminados. O prosseguimento da pesquisa sem esta consideração poderia acarretar análises imprecisas, induzindo a conclusões equivocadas.

Neste ponto, vale destacar que nos casos de intervenções interrompidas, independentemente do motivo, estas foram rastreadas e agrupadas para garantir a continuidade do processo. A inobservância destes critérios poderia acarretar dois efeitos indesejados: o primeiro é utilizá-lo no cálculo do tempo médio de intervenção, o que geraria distorções. O segundo é que, a mesma sonda ou uma outra retornaria ao poço para concluir a intervenção, contabilizando duas intervenções e que, futuramente seriam consideradas como duas falhas seguidas no mesmo poço.

3.6 CRITÉRIOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO / PREMISSAS

Para a análise dos dados, uma premissa básica adotada é a independência entre o mecanismo de falhas e o modo como os dados foram censurados. Isto significa que os poços que sobreviverem até um tempo t_i , não devem ter os seus prognósticos alterados se eles sofrerem uma censura em t_j . Estatisticamente, isto equivale ao conceito de censura arbitrária (Accioly, 1995).

No caso de poços que sofreram intervenção e retornaram à normalidade, os seus comportamentos foram considerados como se fossem novos.

Além disto, a falha de um dos componentes do poço implica na falha de todo o conjunto, o sistema poço. É adotado um modo de falha pelo elo mais fraco. Ampliando esta premissa, uma queda de performance do sistema poço não representa uma falha. Somente a interrupção total do funcionamento do sistema, poço fechado, devido à falha de um dos seus componentes vitais, que exige a alocação de uma sonda de intervenção, é considerado propriamente como falha.

Nos outros casos, os dados de tempo de vida do sistema poço são considerados como censurados, isto é, o sistema parou de funcionar por outros

motivos que não a falha primária de qualquer componente vital para a plena operação do poço. Para exemplificar, podemos citar os casos previstos de remanejamento de poços entre plataformas de produção e que durante as intervenções ocorreram falhas de equipamentos; falhas decorrentes de falta de recursos apropriados para prosseguimento normal das operações, determinando sua interrupção; intervenções devido à implantação de programas de melhorias operacionais, comportamento “anormal” do reservatório devido às suas próprias incertezas e falhas induzidas por premissas de projeto ou decisões gerenciais.

Outro aspecto importante a ser considerado é o estado, a situação do poço. Um poço, em um determinado tempo ou período, pode ter um dos seguintes estados, segundo o SIP:

- Não interligado;
- Em operação normal;
- Produzindo com deficiência;
- Fechado contabilizando perda;
- Fechado por estratégia de produção;
- Fechado sem contabilizar perda;
- Desativado ou abandonado.

Conforme o conceito de falha em poços adotado neste trabalho, uma premissa adotada é que somente serão considerados os seguintes estados: poço em operação normal e desativado ou abandonado. Portanto, os demais estados não são apreciados.

O recurso principal para a realização das intervenções em poços é a sonda de intervenção ou completação. As intervenções com barcos especiais e de estimulação são considerados recursos secundários, não sendo objeto deste trabalho. Muito embora algumas intervenções em poços para a remoção de parafina em linhas de produção e injeção, denominado de contra-fluxo via UEP (Unidade Estacionária de Produção), e remoções de hidratos em ANM e nas linhas possam ser realizadas com estes barcos, todas as intervenções catalogadas neste trabalho

foram efetivamente realizadas com sondas, conforme indicado nos bancos de dados.

Cabe ressaltar, neste ponto, que falhas em poços podem ocorrer devido à não observância de procedimentos operacionais específicos. Isto equivale a dizer que falhas em poços, como em quaisquer sistemas, podem ser devidas a erros humanos. Estes tipos de falhas, que chamamos de “falhas induzidas”, ou “falhas externas”, em muitos casos de difícil percepção, não são objetos deste trabalho.

3.7 CONFIABILIDADE DOS BANCOS DE DADOS

Conforme mencionado anteriormente, os dados foram coletados de diversos bancos de dados, já que nenhum, sozinho, continha dados completos sobre as intervenções em poços. Qualquer análise estatística só terá valor se for baseada em um banco de dados confiável que represente, o mais fielmente possível, a realidade dos fatos.

Neste trabalho, devido ao grande número de dados existentes, foi necessário o cruzamento, com auxílio computacional, entre os principais bancos de dados, o NewBD e o SDC. O banco de dados resultante revelou a existência de uma série de lacunas e inconsistências entre o motivo pelo qual a sonda foi alocada ao poço e o motivo real da intervenção, ou seja, o que na verdade foi realizado. Estes resultados do cruzamento foram convertidos em uma tabela resumo estruturado em *Excel* – Microsoft. Estas inconsistências e lacunas exigiram a leitura crítica obrigatória de todos os boletins de intervenções (BDCA) para promover a rastreabilidade das intervenções, identificando a duração e o motivo real. Neste processo de leitura, o objetivo fundamental, além da identificação do motivo real da intervenção, era a determinação da causa básica e detalhes operacionais, por meio de palavras-chaves, fortemente associadas a cada tipo de intervenção. Esta estratégia permite o fácil e rápido acesso a consultas acerca de quaisquer falhas ocorridas nos poços.

Portanto, o banco de dados obtido, a base única para trabalho, possui o crédito de ser resultante de uma compilação criteriosa baseada no histórico de todas as intervenções em poços do campo em estudo.

Desta forma, este banco de dados adquiriu a confiabilidade adequada para prosseguimento do trabalho, requerendo, inclusive, futuras atualizações periódicas para a manutenção da sua validade para pesquisas posteriores.

3.8 TABULAÇÃO DOS DADOS

Primeiramente, as datas de início e fim de operação foram organizadas em tabelas estruturadas em *Excel* – Microsoft. Isto é imperioso para o cálculo da vida média dos poços.

A partir deste ponto, os demais dados foram agrupados e tabulados, anualmente, em planilha *Excel* – Microsoft, incluindo filtros para pesquisa. Com a finalidade de analisar melhor a taxa de falha, intervenções em poços, os dados foram subdivididos em dois grandes grupos: poços produtores e poços injetores.

Conforme citado no item 3.4, os dados tabulados não serão apresentados, em sua íntegra, por se tratar de informações confidenciais de propriedade da PETROBRAS.

3.9 INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS

Convém, neste ponto, antes da aplicação das técnicas estatísticas, proceder à exploração e a análise expedita dos dados coletados. Isto é muito importante porque revela uma idéia prévia do comportamento dos dados. Para isto, utilizamos os gráficos elaborados em *Excel* – Microsoft.

A partir das tabelas supracitadas, foram construídas as bases de dados para análise e traçados os gráficos de taxa de falha e sua evolução em relação ao tempo de todos os poços do projeto.

Pode-se observar que uma análise gráfica dos dados mais apurada revela uma “curva de aprendizado” do projeto de desenvolvimento da Produção de 1991 a 2003.

Além disto, são apresentadas as linhas de tendência de poços em operação e as linhas de tendência do número de intervenções. Estas linhas geraram a linha do

percentual de intervenções anuais, ou seja, as falhas ocorridas durante o período estudado. Este procedimento foi aplicado a todos os poços de projeto de forma global e depois, separadamente, para poços produtores e para poços injetores.

A figura 3.2 apresenta o panorama geral de todos os poços que sofreram intervenção no período 1991 a 2003. Observa-se, nitidamente, que no início do projeto a taxa de falha foi elevada, caindo gradativamente à medida que a população de poços crescia. Isto resultou uma curva de tendência de intervenções levemente crescente com o tempo, mas revelando, no cômputo geral, a aprendizagem e os avanços do projeto.

Pode-se observar que com o passar do tempo, o número de poços em operação foi aumentando, mas mesmo assim o percentual de intervenções, de forma proporcional, caiu gradativamente o tempo. Esta observação também é aplicável aos poços produtores e injetores, separadamente. Além disto, os poços produtores dominam fortemente o cenário, isto é, são os responsáveis pelo panorama geral do projeto quanto às falhas ocorridas nos poços. Portanto, conclui-se que, embora importante, os poços injetores não constituem problemas maiores ao projeto.

A alta taxa de falha encontrada no início do projeto reflete a introdução de novas tecnologias em águas profundas, a baixa confiabilidade de determinados equipamentos, muitos ainda em fase de testes de aceitação, serviços ainda sem procedimentos operacionais específicos e, finalmente todos os desafios inerentes à implantação de um projeto de desenvolvimento da produção em um campo de grande porte em águas profundas. De forma análoga, isto também se aplica aos poços produtores e injetores, separadamente.

A tabela 3.1 mostra a totalização das intervenções em poços produtores e injetores.

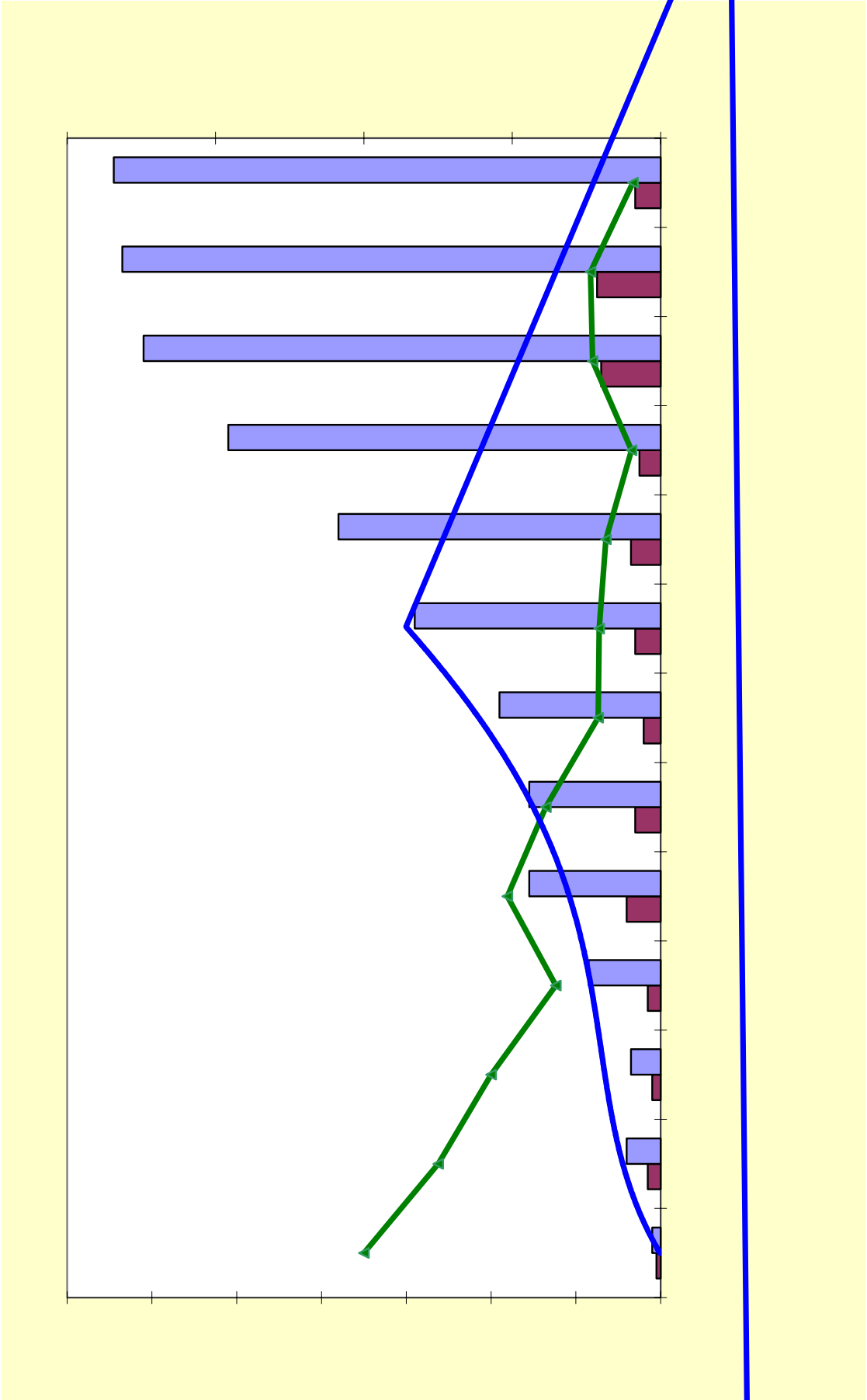


Tabela 3.1 – Totalização das intervenções em poços

ANO	Nº DE INTERVENÇÕES	Nº DE POÇOS EM OPERAÇÃO	% DE FALHAS
1991	1	2	50,0%
1992	3	8	37,5%
1993	2	7	28,6%
1994	3	17	17,6%
1995	8	31	25,8%
1996	6	31	19,4%
1997	4	38	10,5%
1998	6	58	10,3%
1999	7	76	9,2%
2000	5	102	4,9%
2001	14	122	11,5%
2002	15	127	11,8%
2003	6	129	4,7%
Total	80		

A figura 3.3 apresenta o panorama geral dos poços produtores que sofreram intervenção no período 1991 a 2003. Observa-se, também, que no início do projeto a taxa de falha foi elevada, caindo gradativamente à medida que a população de poços crescia. Da mesma forma, Isto resultou em uma curva de tendência de intervenções crescente com o tempo. A tabela 3.2 mostra a totalização das intervenções em poços produtores.

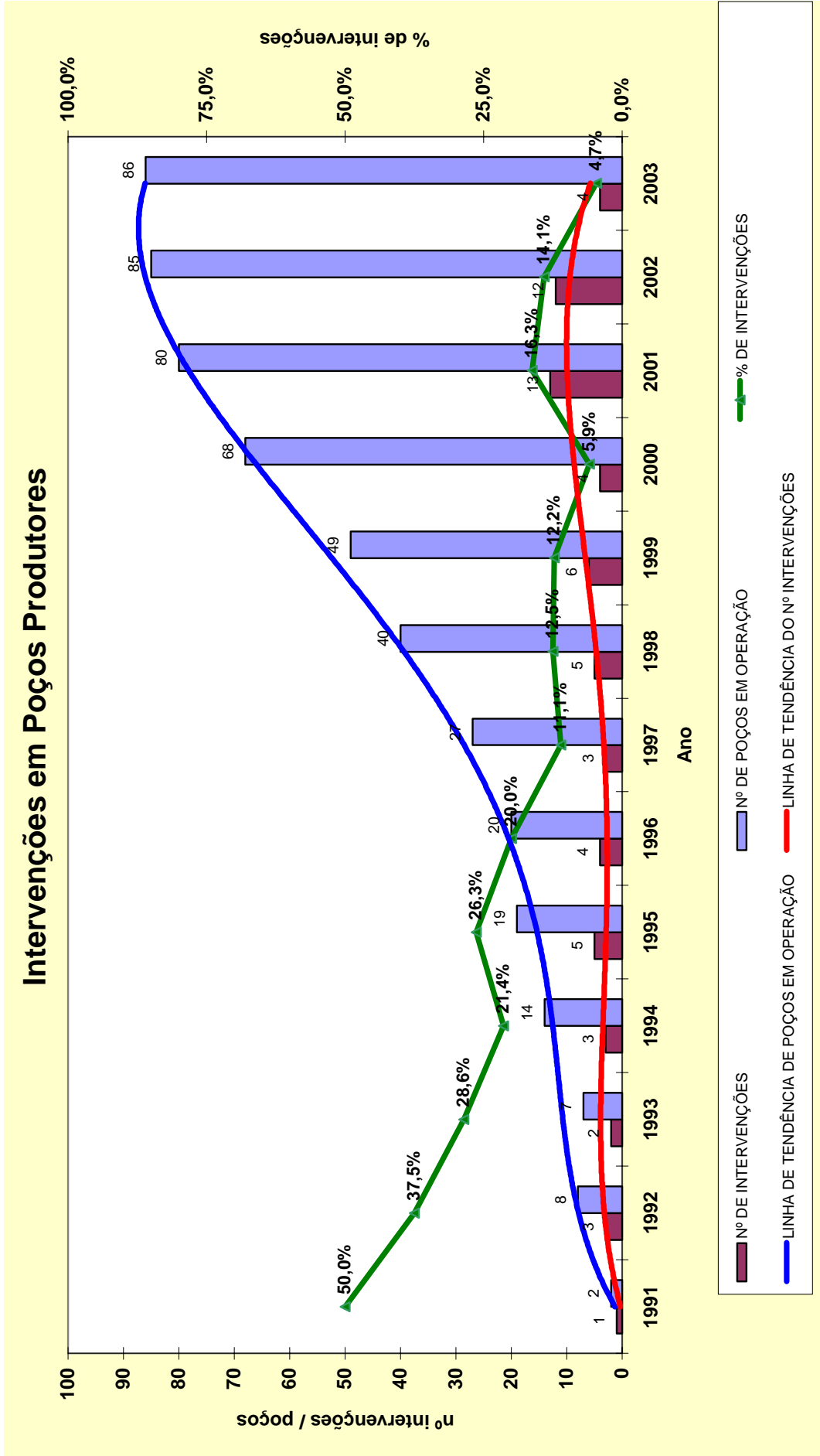


Figura 3.3 – Panorama geral das intervenções em poços produtores

Tabela 3.2 – Totalização das intervenções em poços produtores

ANO	Nº DE INTERVENÇÕES	Nº DE POÇOS EM OPERAÇÃO	% DE FALHAS
1991	1	2	50,0%
1992	3	8	37,5%
1993	2	7	28,6%
1994	3	14	21,4%
1995	5	19	26,3%
1996	4	20	20,0%
1997	3	27	11,1%
1998	5	40	12,5%
1999	6	49	12,2%
2000	4	68	5,9%
2001	13	80	16,3%
2002	12	85	14,1%
2003	4	86	4,7%
Total	65		

A figura 3.4 revela o panorama geral dos poços injetores que sofreram intervenção no mesmo período. Observa-se, também, que no primeiro ano de implantação, a taxa de falha atingiu o pico, caindo rapidamente à medida que a população de poços crescia. Isto resultou em uma curva de tendência de intervenções decrescente com o tempo. Esta figura revela que os poços injetores não constituem problema ao projeto quanto ao número de intervenções. Além disto, os poços injetores iniciaram as operações com quatro anos de defasagem em relação aos produtores. Os dados indicam que os poços injetores parecem falhar menos que os produtores. Isto pode ser devido aos seguintes fatores: os poços injetores são mais jovens, o projeto de completação, em muitos casos, é simplificado em relação aos poços produtores, a água de injeção parece ser menos agressiva que os fluidos produzidos (óleo e gás), a ANM (Árvore de Natal Molhada) de injeção é bem mais simples que a ANM utilizada em poços produtores e, finalmente, os poços injetores não são equipados com a DHSV (Válvula de Segurança de Subsuperfície).

A tabela 3.3 mostra a totalização das intervenções em poços injetores.

Intervenções em Poços Injetores

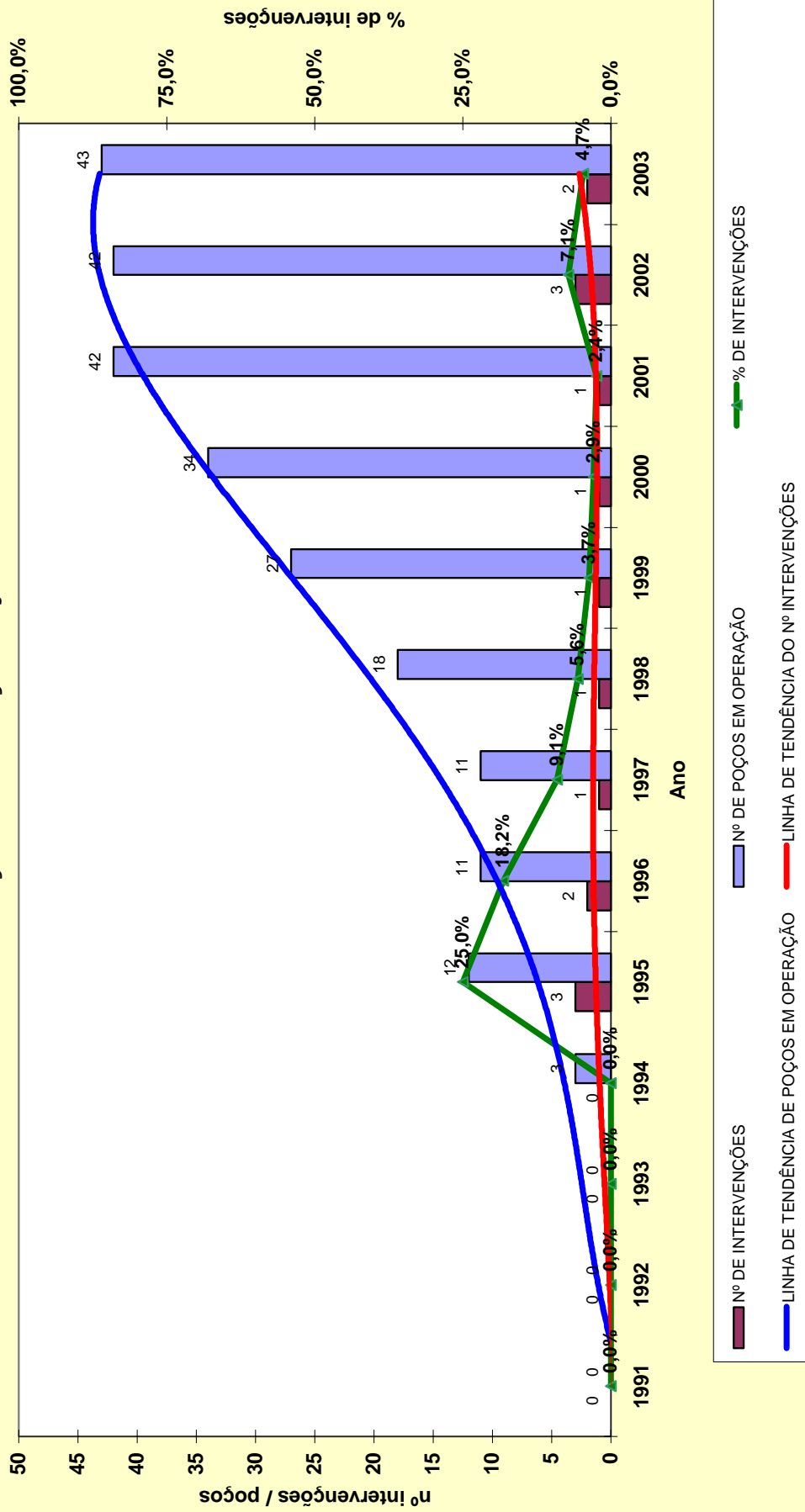


Figura 3.4 – Panorama geral das intervenções em poços injetores

Tabela 3.3 – Totalização das intervenções em poços injetores

ANO	Nº DE INTERVENÇÕES	Nº DE POÇOS EM OPERAÇÃO	% DE FALHAS
1991	0	0	0,0%
1992	0	0	0,0%
1993	0	0	0,0%
1994	0	3	0,0%
1995	3	12	25,0%
1996	2	11	18,2%
1997	1	11	9,1%
1998	1	18	5,6%
1999	1	27	3,7%
2000	1	34	2,9%
2001	1	42	2,4%
2002	3	42	7,1%
2003	2	43	4,7%
Total	15		

Além disto, foi gerada uma figura da quantificação do motivo de intervenções por ano, revelando o número das ocorrências das principais causas de intervenções ocorridas nos poços.

Antes do início deste trabalho de pesquisa, a DHSV (Válvula de Segurança de Sub-Superfície) era tida como a principal responsável por intervenções em poços. Mas, os dados contradizem isto claramente, mostrando que o principal motivo gerador de intervenções em poços é a formação de hidrato nas ANM's (Árvores de Natal Molhada) e nas linhas que interligam os poços às plataformas de produção. Portanto, os dados indicam que as falhas em DHSV ocupam a sexta posição como responsáveis pelas intervenções em poços do campo em estudo.

Após a reorganização dos dados coletados, os principais motivos das intervenções em poços foram revelados em termos percentuais. Uma outra forma de visualizar os resultados é a classificação dos motivos geradores das intervenções segundo as suas respectivas durações. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 3.5. e 3.6, respectivamente.

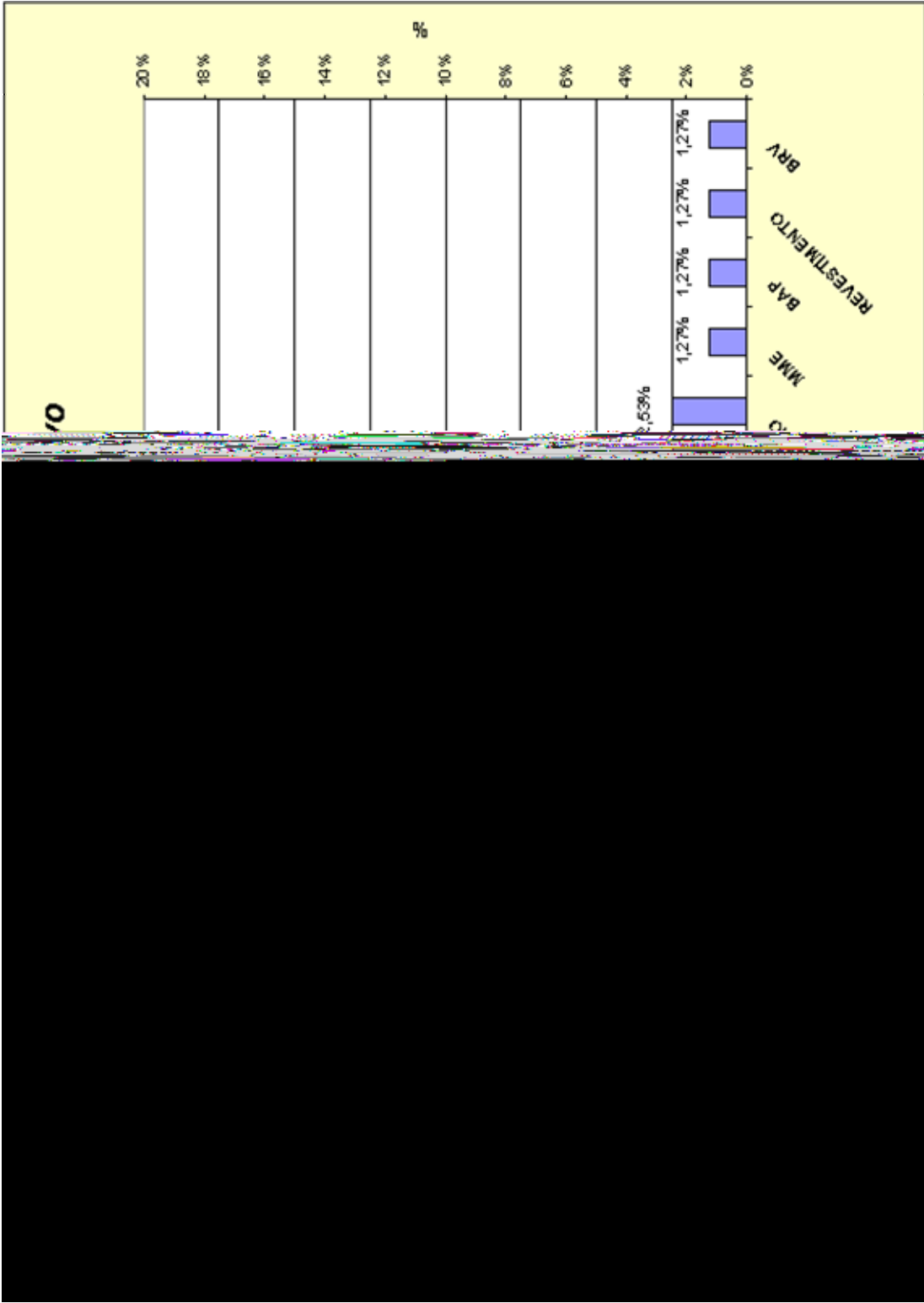


Figura 3.5. – Principais causas geradoras de intervenção

De posse dos resultados acima, conclui-se que os principais motivos geradores de intervenções em poços no campo em estudo são responsáveis por 64,55 % das falhas. Portanto, é justamente sobre estas causas que a gerência de planejamento de intervenções em poços deve atuar. As demais causas, embora importantes, não constituem problemas maiores ao projeto já que são bastante pulverizadas, algumas inclusive contendo apenas um único registro de ocorrência.

É lógico que a classificação proposta para a identificação das principais causas de falhas em poços é bastante estratificada. Isto é imperioso para podermos identificar a causa básica, o motivo real de cada intervenção. Caso o objetivo do estudo não necessite de tantos detalhes, uma proposta aceitável seria agrupar as causas geradoras de intervenções, correlacionadas entre si, em três tipos básicos: problemas de escoamento, problemas mecânicos e de meio ambiente. A estratificação proposta inicialmente é mais apropriada ao estudo em questão.

3.10 A CURVA DE APRENDIZADO

A análise expedita das figuras 3.2, 3.3 e 3.4, revela, dentro de certos limites e de forma qualitativa, a curva de aprendizado do projeto de desenvolvimento da produção referente às falhas em poços.

Vale ressaltar, neste ponto, que nos cinco primeiros anos do projeto, a taxa de falha global dos poços era bastante alta, caindo de 50 para 33%. Esta análise refere-se aos poços produtores principalmente, já que os injetores entraram em operação com quatro anos de defasagem.

Este período corresponde, justamente à fase de implantação do projeto onde, devido à necessidade de vencer desafios tecnológicos em águas profundas, a PETROBRAS partiu para desenvolver e testar novas tecnologias referentes à engenharia de poços. Estas novas tecnologias traziam embutidos os riscos inerentes, propensos a altas taxas de falhas. Este pacote incluía a baixa confiabilidade dos equipamentos, muitos ainda em fase de experimentação e testes. Além disto, por falta de conhecimento acumulado, não existiam procedimentos específicos para muitas operações. Isto, possivelmente, induziu a ocorrência de falhas em componentes dos poços. Por sua vez, estes componentes foram

adquirindo melhor confiabilidade no decorrer do tempo devido às melhorias implantadas nos projetos de fabricação e nos procedimentos de instalação e operação.

Portanto, podemos considerar que as figuras 3.2, 3.3 e 3.4, revelam, de forma qualitativa, as curvas de aprendizado do projeto.

4. APLICAÇÃO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE / ANÁLISE PROBABILÍSTICA

4.1 INTRODUÇÃO

Conforme exposto no capítulo anterior, antes da aplicação das técnicas da engenharia de confiabilidade, estatísticas e probabilísticas, procedemos à exploração e à análise expedita dos dados coletados. Isto foi muito importante porque revelou uma idéia prévia do comportamento dos dados e suas tendências, utilizando os gráficos elaborados em *Excel* – Microsoft.

A partir da tabulação dos dados, foram construídas as bases de dados para análise e traçados os gráficos de taxa de falha e sua evolução em relação ao tempo de todos os poços do projeto. Além disto, as principais causas geradoras de intervenções foram identificadas e quantificadas em termos percentuais.

Agora passaremos a analisar estes mesmos dados utilizando técnicas de engenharia de confiabilidade, estatísticas e probabilísticas, dentro do contexto da análise do tempo de vida dos poços petrolíferos. Para isto, utilizaremos, como ferramenta para análise, o *software* comercial denominado “Weibull ++ Versão 6.0” da Reliasoft. Em estudos anteriores referentes às análises das causas de intervenções em poços, conforme descritos na revisão bibliográfica, foi utilizado o *software* comercial “Weibull ++ Versão 5.0” aliada a um outro denominado de “Best

Fit". Além disto, também foi utilizado outro *software* comercial denominado de "SPLIDA" para a análise de tendência do comportamento de poços produtores de óleo e injetores de água. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios considerando-se a quantidade de dados e a época em que foram realizados. Inclusive, à época foram sugeridas análises mais avançadas para subsidiar o planejamento das manutenções em poços.

4.2 O PROGRAMA "WEIBULL ++ 6.0"

O software comercial denominado "Weibull ++ Versão 6.0" da Reliasoft é uma ferramenta aplicável à engenharia de confiabilidade, especificamente quanto à análise de dados de tempo de vida. Inclui, como opções para a análise, diversas distribuições de vida: Weibull (1, 2 e 3 parâmetros),

A estes dados foram acrescentados os dados dos poços que nunca sofreram intervenção.

Esta análise inclui também os tempos de vida dos poços até a data da censura dos dados, ou seja, até a data final da coleta de dados em 30/09/2003. Estes tempos são denominados de tempos censurados, sendo, neste caso uma censura à direita. Desta forma cada tempo recebe um atributo que define se o mesmo é uma falha (F) ou uma censura (S).

Para esta análise, os dados foram separados em dois grupos: poços produtores e poços injetores. Isto porque os modos e tempos de falha são completamente distintos nestes dois grupos não sendo adequada sua análise de forma conjunta. Os perfis de comportamento destes dois grupos e suas tendências foram revelados, mesmo que de forma exploratória, no capítulo anterior.

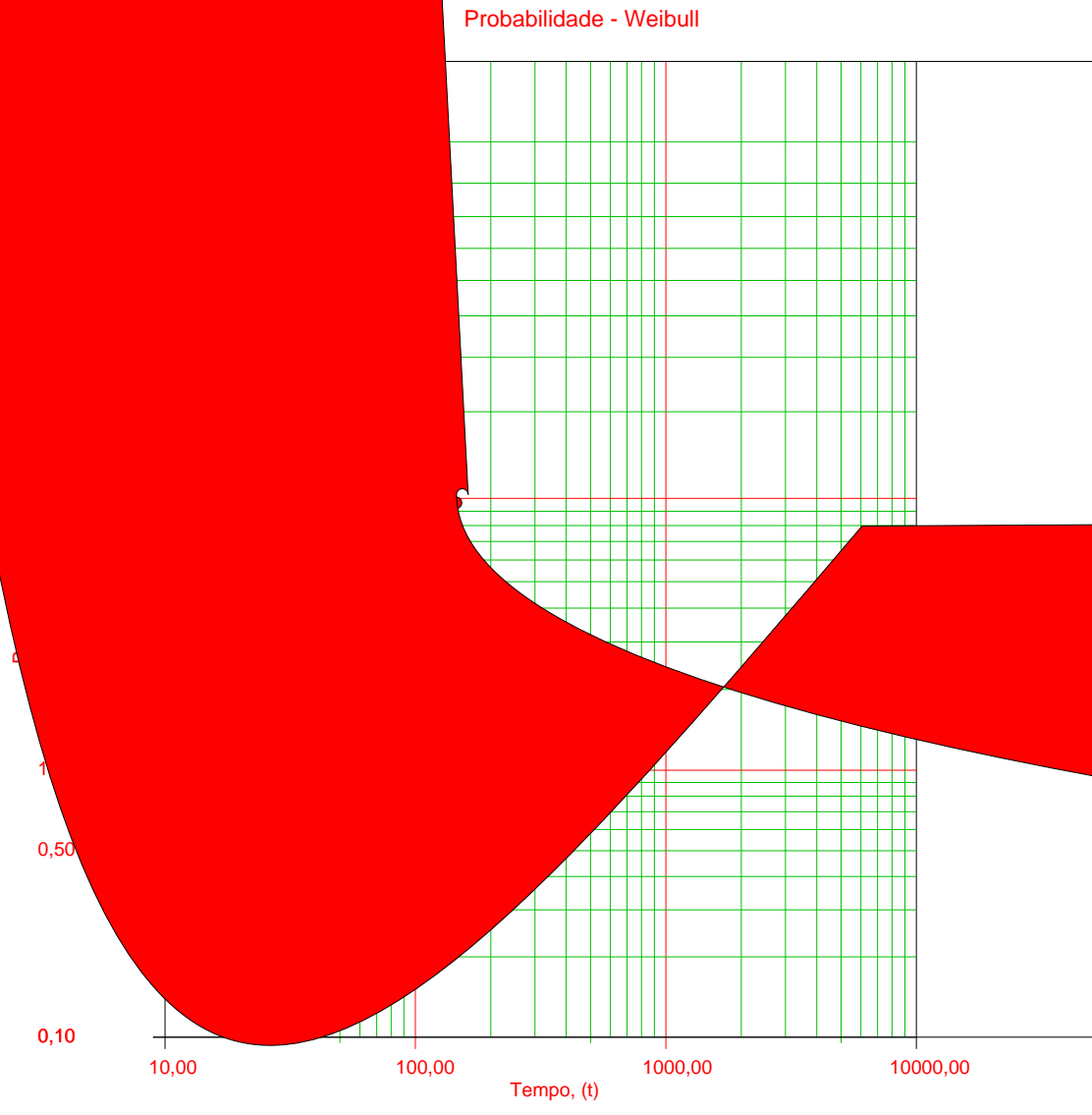
4.4 ANÁLISE DOS POÇOS PRODUTORES

Para a análise dos poços produtores, primeiramente, necessitamos definir a distribuição de probabilidade que é mais adequada para descrevermos os dados observados. A próxima etapa será a obtenção das probabilidades de falha além da forma da função taxa de falhas.

O primeiro passo é analisar a adequação do ajuste para as distribuições que são, geralmente, utilizadas na literatura para modelar tempos de vida. O software “Splus” conjuntamente com uma biblioteca específica para este tipo de estudo, a “SPLIDA”, pode facilitar esta tarefa, por exemplo.

Os ajustes para seis tipos diferentes de distribuições de probabilidade são apresentados nas figuras 4.1. a 4.6. Visualmente, podemos concluir que os modelos que são mais adequados aos dados são o Weibull 2 e 3 parâmetros, exponencial com 1 parâmetro e a lognormal.

A tabela 4.1 apresenta a classificação dos resultados das distribuições em função do melhor ajuste para descrição dos dados observados com seus respectivos valores encontrados utilizando-se o método da máxima verossimilhança.



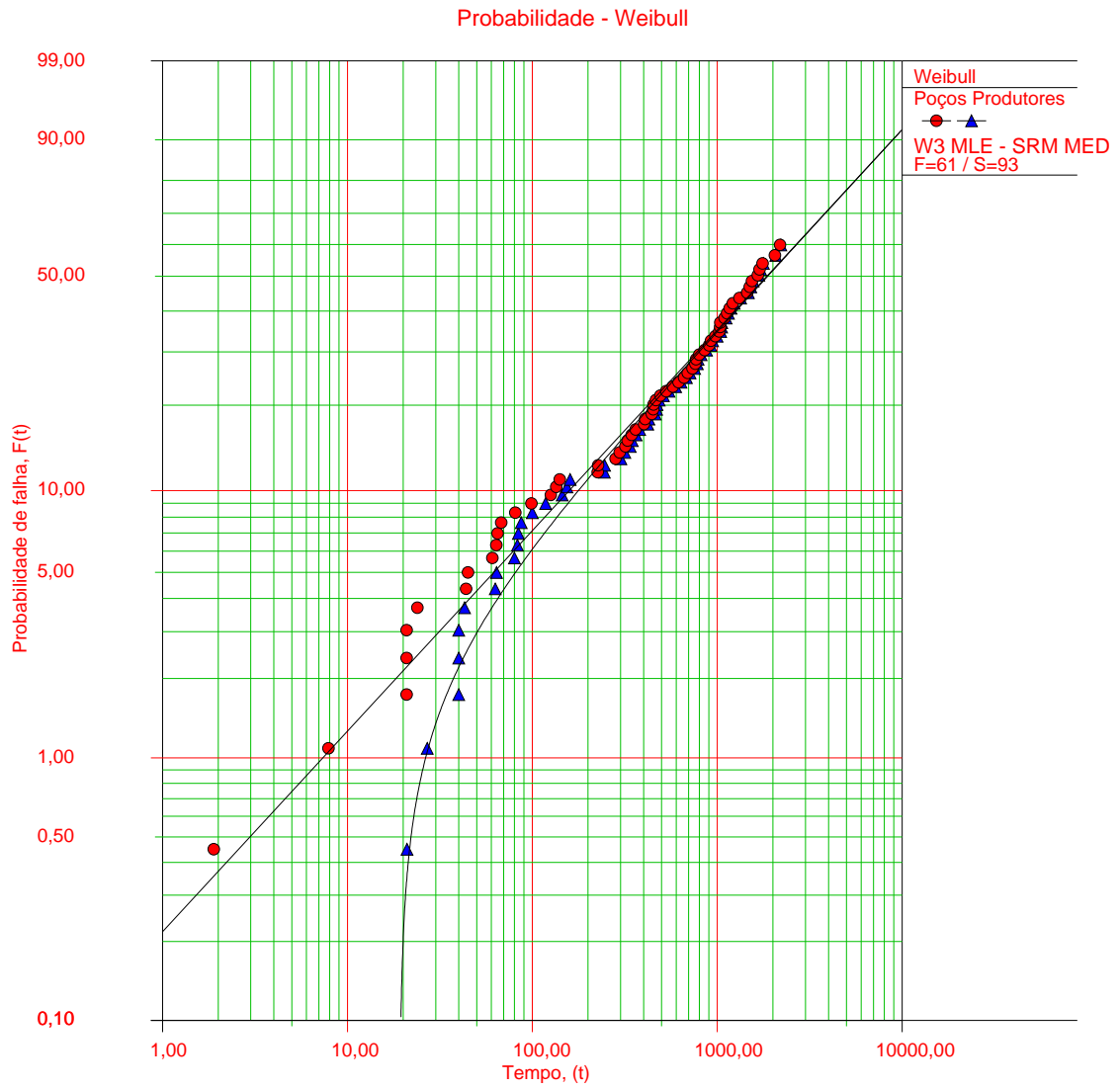
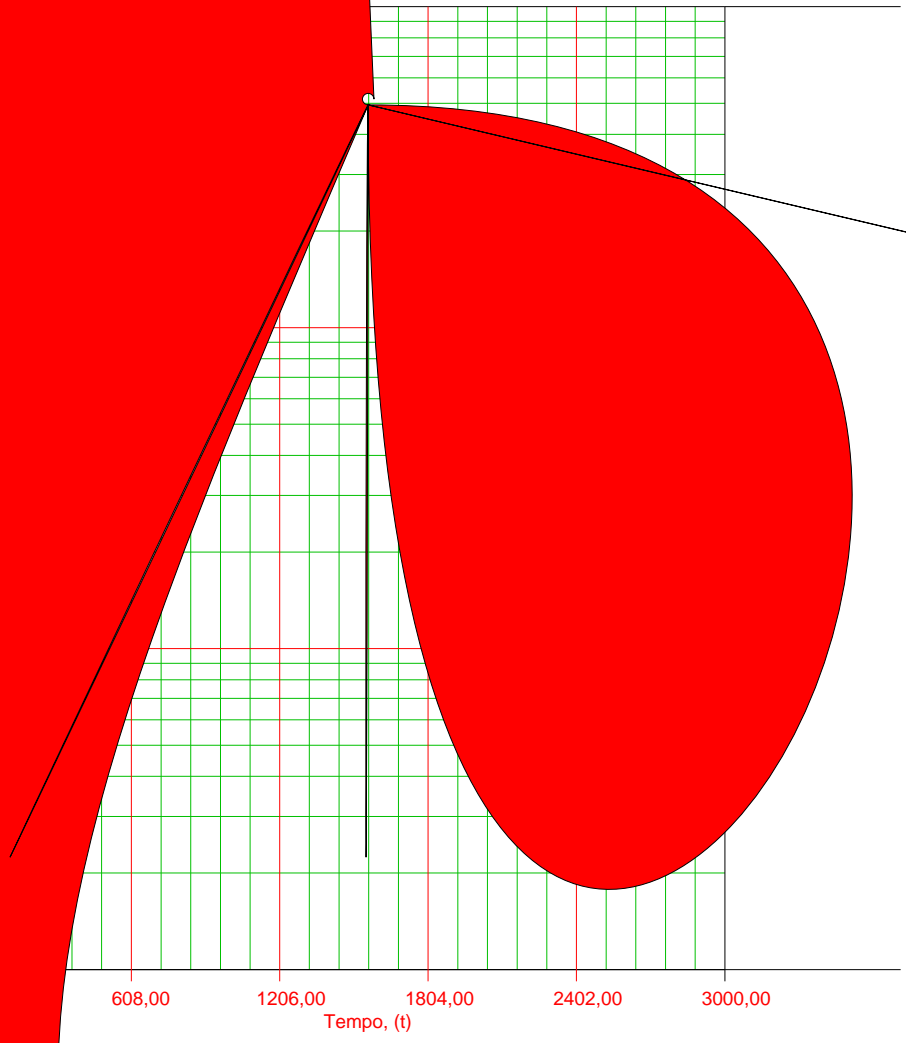
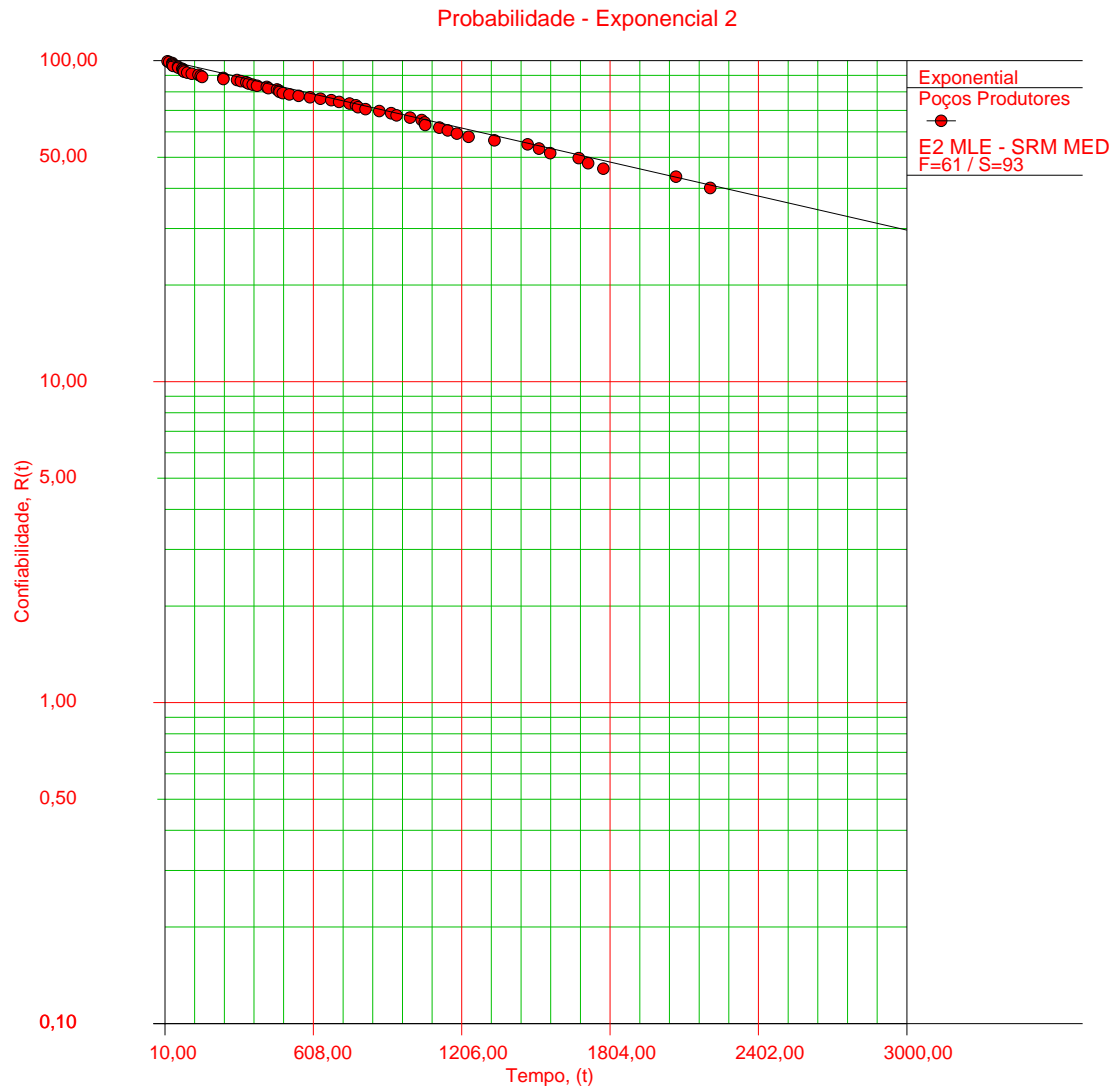


Figura 4.2.: Ajuste dos dados para a distribuição Weibull com 3 parâmetros

de - Exponencial 1





$\lambda=0,0004, \gamma=21,0000$

Figura 4.4.: Ajuste dos dados para a distribuição Exponencial com 2 parâmetros

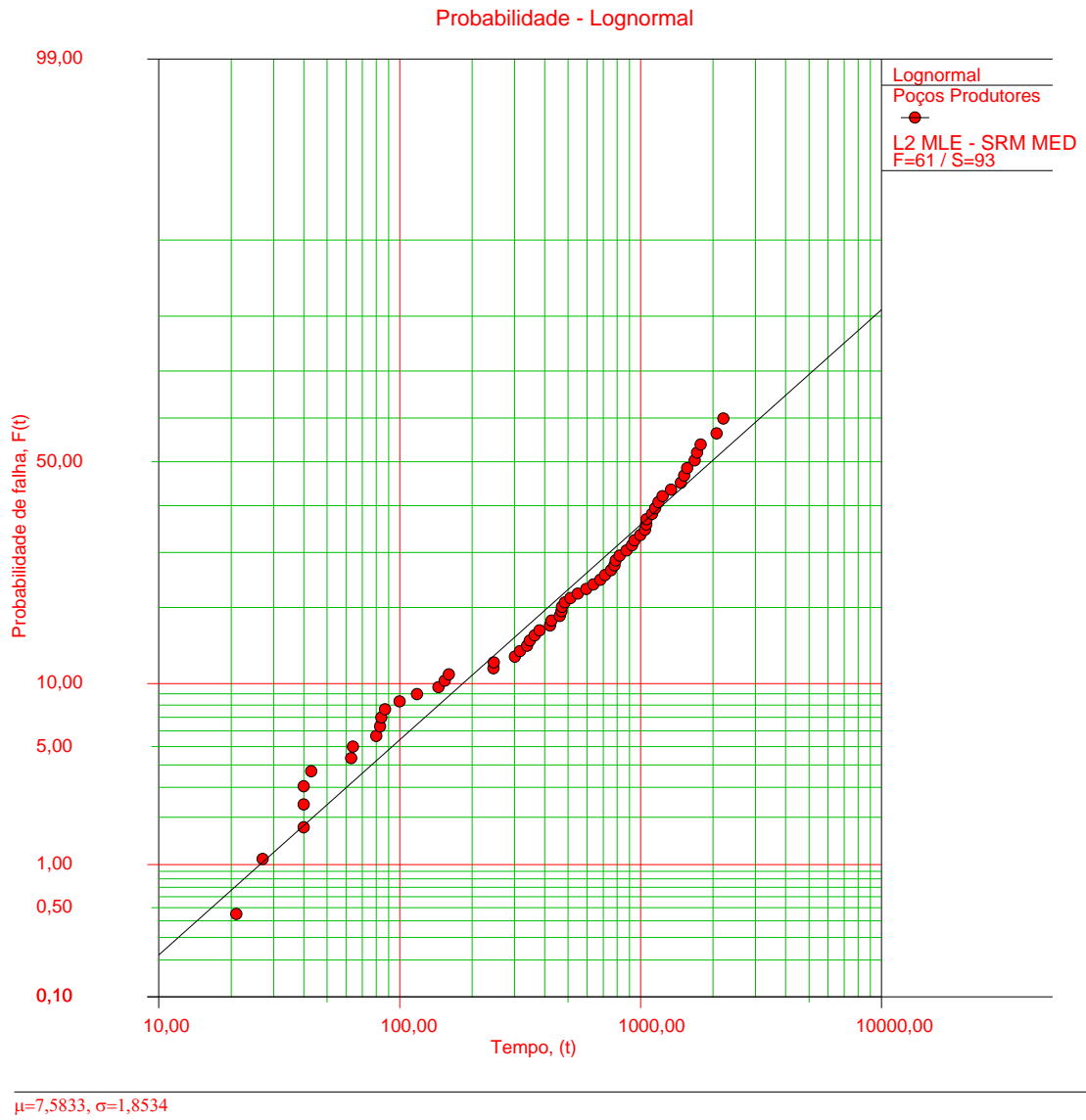


Figura 4.5.: Ajuste dos dados para a distribuição Lognormal

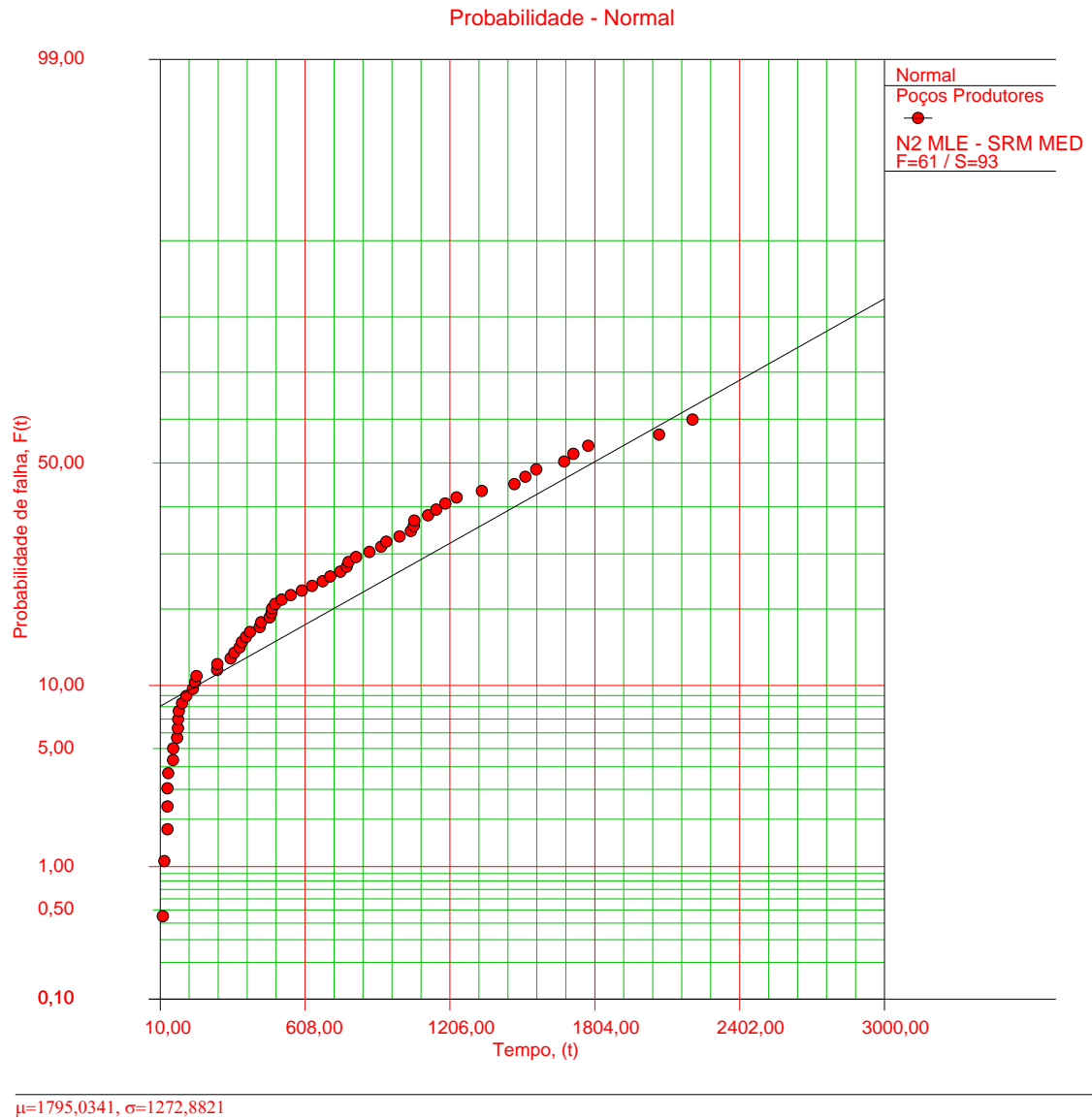


Figura 4.6.: Ajuste dos dados para a distribuição Normal

Tabela 4.1.: Ajuste dos parâmetros e valores de máxima verossimilhança

DISTRIBUIÇÃO	RANKING	MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA
Exponencial 1	3	- 538,30959
Exponencial 2	5	- 537,00300
Normal	6	-570,90591
Lognormal	4	- 536,77035
Weibull 2	2	- 536,98783
Weibull 3	1	- 533,86759

Conforme citado anteriormente, os resultados gráficos e os valores de verossimilhança encontrados indicam que os melhores modelos são, respectivamente, o Weibull com 3 e Weibull com 2 parâmetros. Contudo, não há uma diferença significativa entre os dois modelos. Considerando estas diferenças desprezíveis, adotaremos o modelo de Weibull com 2 parâmetros para a análise dos dados de falhas e tempo de vida dos poços produtores do campo em estudo, utilizando o método da máxima verossimilhança. Além disto, esta distribuição tem sido mais empregada na literatura para este tipo de análise.

4.4.1 Ajuste de Weibull Para os Poços Produtores

O ajuste de Weibull obtido para os poços produtores está representado, graficamente, na figura 4.1. Os parâmetros encontrados para o modelo de Weibull foram: parâmetro de forma 0,8428 e parâmetro de escala 2824,4936.

Quando o parâmetro de forma é menor que um, os dados indicam um comportamento da taxa de falhas como sendo decrescente em relação ao tempo. Observamos pelo ajuste que os dados de falha correspondentes às falhas prematuras tem um comportamento não totalmente representado ou definido pelo modelo. A partir de 250 dias os dados apresentam uma aderência bem maior ao modelo ajustado. Mesmo não sendo o escopo deste trabalho, para estas falhas prematuras, correspondente ao início de operação do projeto, uma alternativa viável

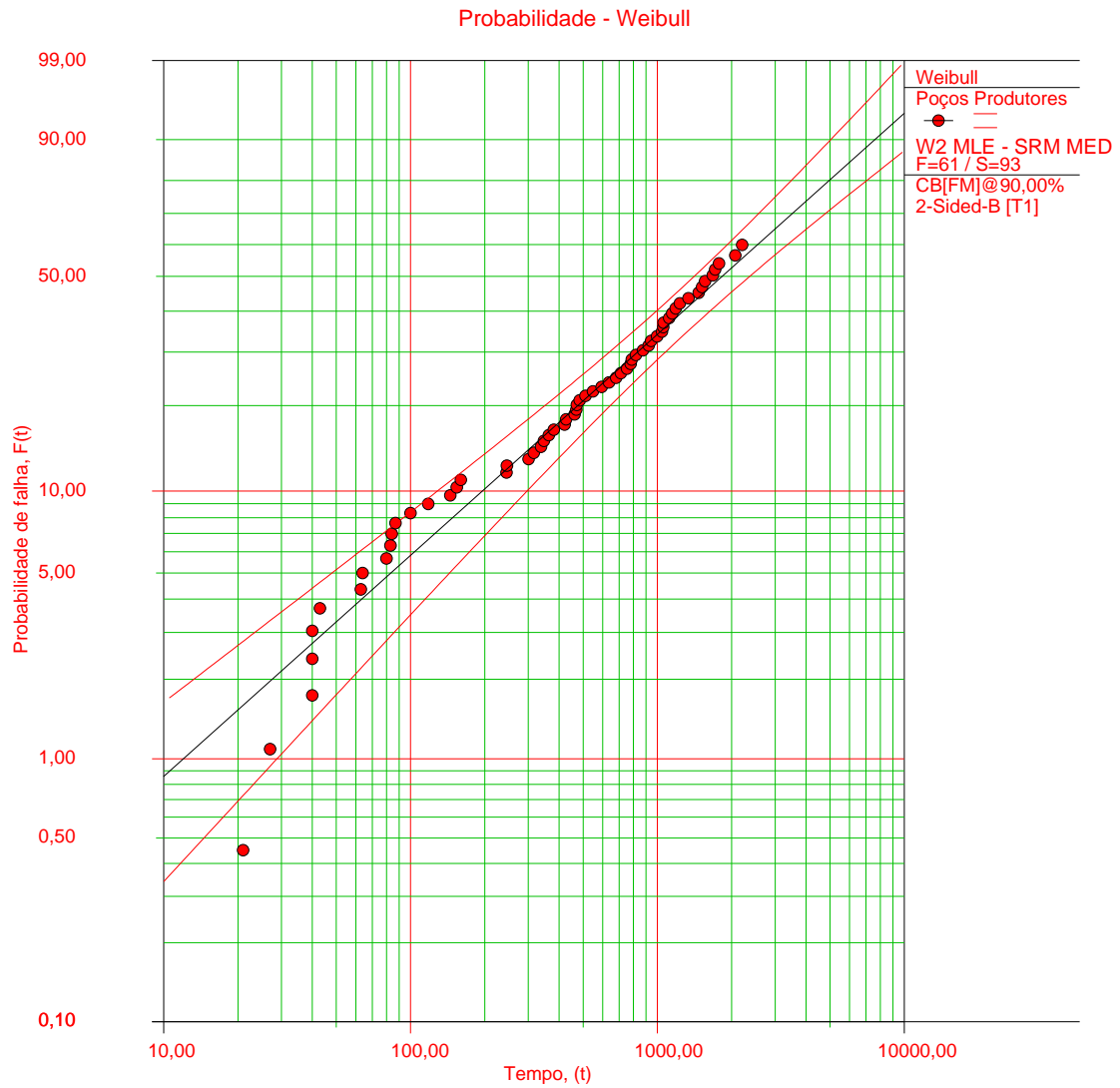
seria o ajuste utilizando um modelo específico representativo, que não será apresentado neste trabalho.

A figura 4.7 apresenta a distribuição de Weibull com os intervalos de confiança de 90%.

As figuras 4.8 a 4.12 apresentam os resultados gráficos, respectivamente, para: confiabilidade X tempo, probabilidade de falha X tempo, função densidade de probabilidade (Pdf), taxa de falha em função do tempo, superfície de contorno e, finalmente, o método da máxima verossimilhança.

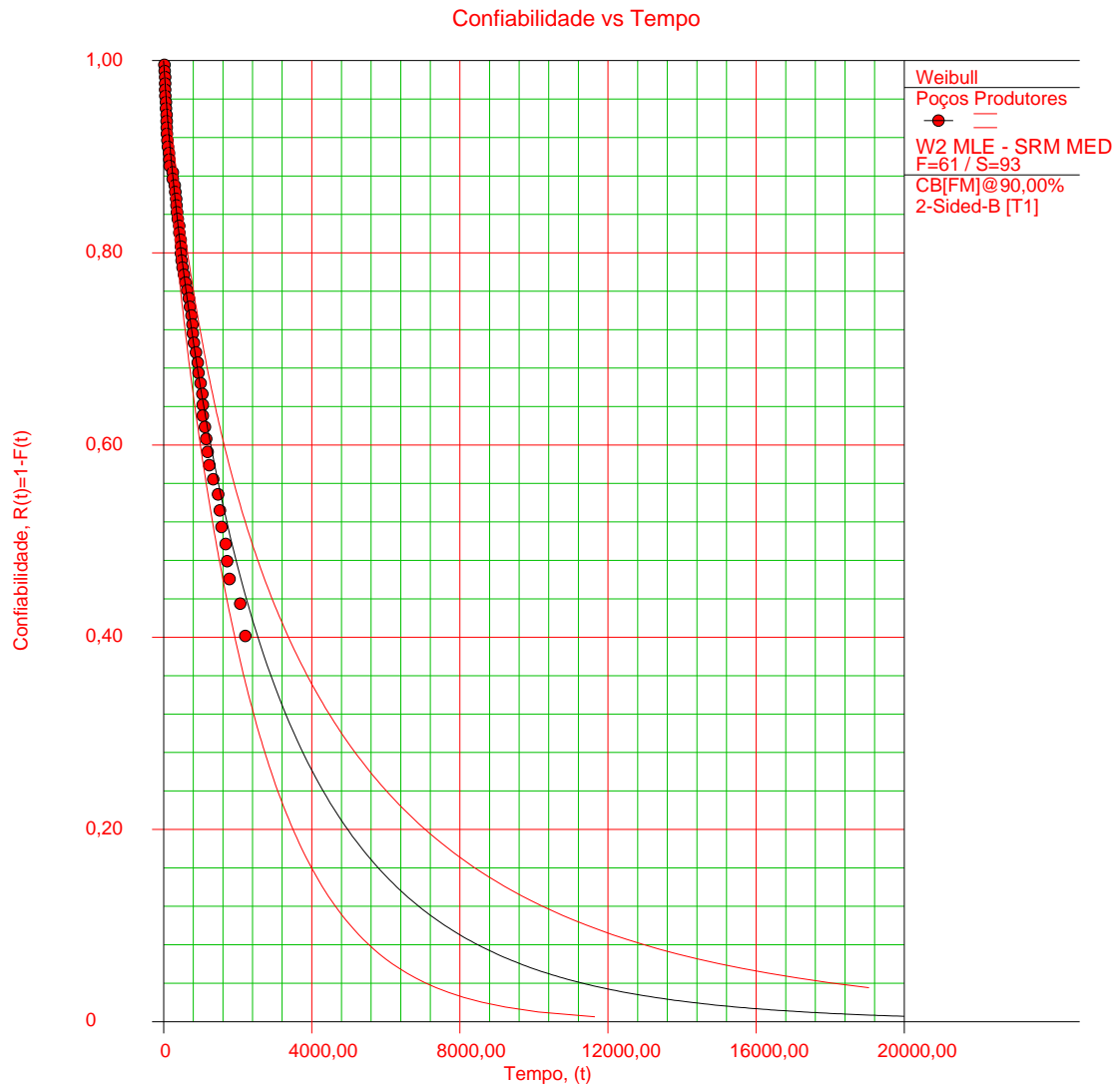
A figura 4.11 apresenta a função taxa de falhas para o ajuste obtido. Nela podemos notar que, inicialmente, dispomos de valores maiores de taxa de falhas que, posteriormente, sofrem uma queda com uma tendência de estabilização. Por outro lado, ao analisar especificamente as falhas prematuras ocorridas, podemos concluir que os valores encontrados para a taxa de falhas seriam bem mais altos.

A tabela 4.2 apresenta as estimativas das probabilidades de falhas até os tempos estabelecidos, ou tempos de vida. Esta tabela mostra que temos, aproximadamente, 5,8% de probabilidade de termos uma falha nos primeiros 100 dias de vida de um poço. Uma outra informação importante é que temos apenas 34% de probabilidade de falha de um poço com menos de 1.000 dias. Da mesma forma, considerando o período de um ano, 365 dias, temos uma probabilidade de falha em um poço produtor de óleo de 16,3%, e assim, sucessivamente, temos diversas probabilidades de falhas em poços produtores com seus respectivos tempos de vida.



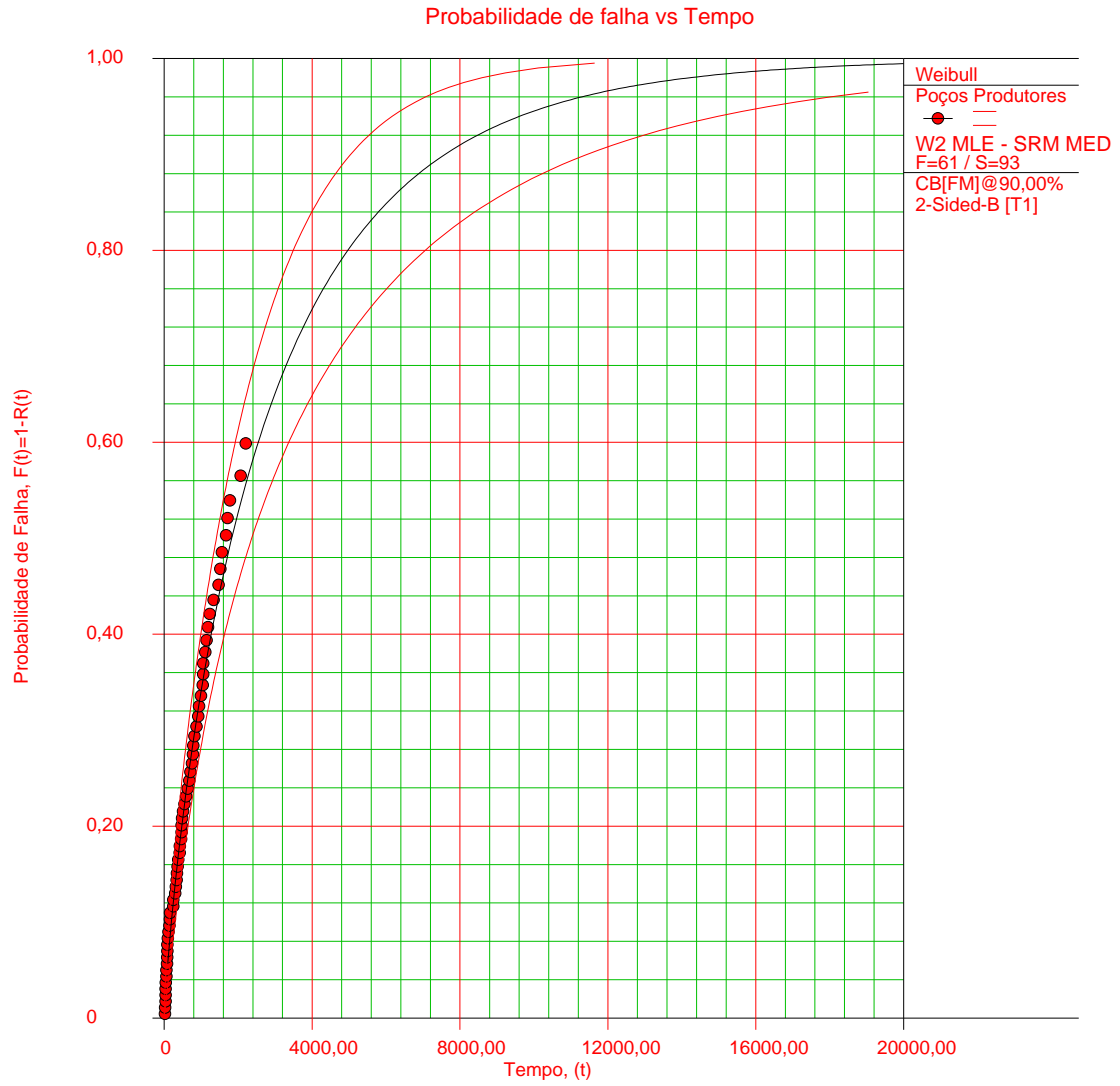
$\beta=0,8428, \eta=2824,4936$

Figura 4.7.: Ajuste dos dados para a distribuição Weibull com 2 parâmetros e intervalos de confiança de 90%



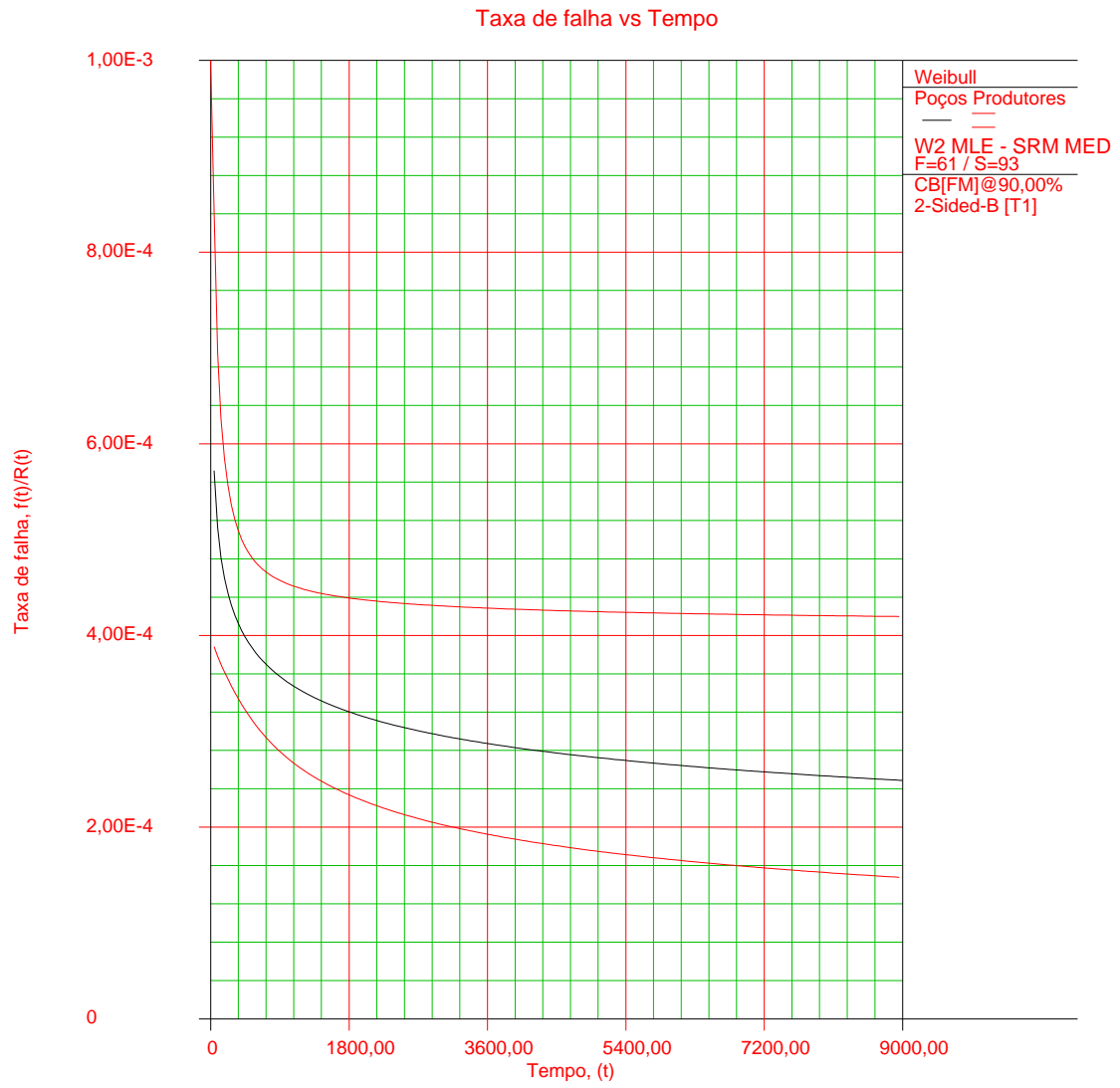
$\beta=0,8428, \eta=2824,4936$

Figura 4.8.: Confiabilidade em função do tempo



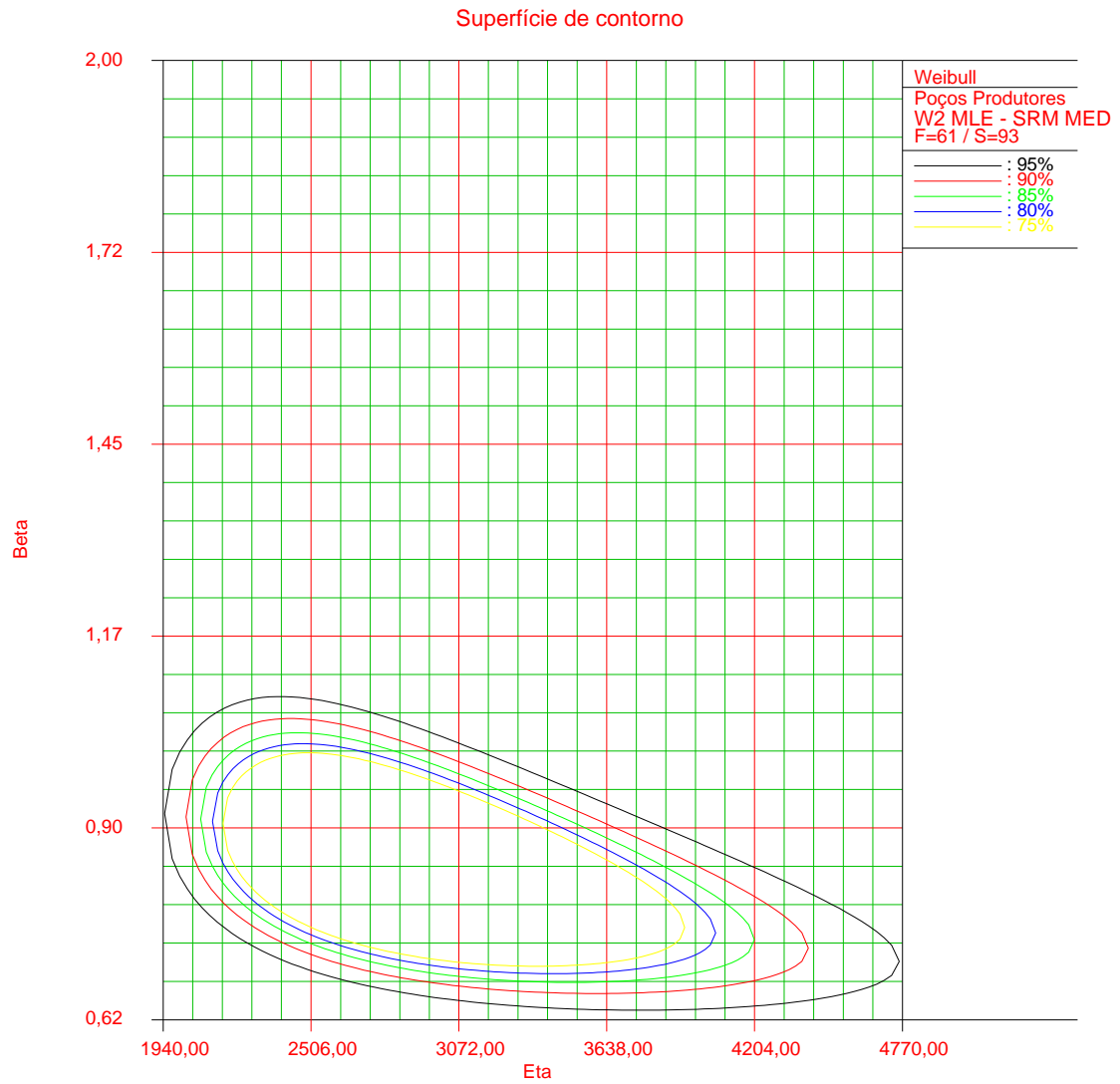
$\beta=0,8428, \eta=2824,4936$

Figura 4.9.: Probabilidade de falha em função do tempo



$\beta=0,8428, \eta=2824,4936$

Figura 4.11.: Função taxa de falha para poços produtores



$\beta=0,8428, \eta=2824,4936$

Figura 4.12.: Superfície de contorno

Superfície da Função de Máxima Verossimilhança

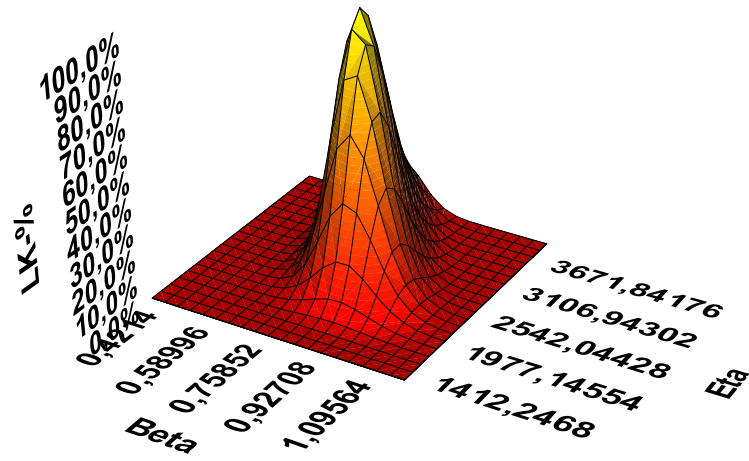


Figura 4.13.: Superfície da função de máxima verossimilhança

Tabela 4.2.: Estimativas das probabilidades de falhas

Tempo (Dias)	Tempo (Anos)	Probabilidade
20	0,05479	0,0153
50	0,13699	0,0328
100	0,27397	0,0581
200	0,54795	0,1018
300	0,82192	0,1402
365	1,00000	0,1633
400	1,09589	0,1752
500	1,36986	0,2074
600	1,64384	0,2374
700	1,91781	0,2655
800	2,19178	0,2920
900	2,46575	0,3171
1000	2,73973	0,3409
1500	4,10959	0,4438
2000	5,47945	0,5265
2500	6,84932	0,5943
3000	8,21918	0,6508
3500	9,58904	0,6982
4000	10,95890	0,7384
4500	12,32877	0,7725
5000	13,69863	0,8018
6000	16,43836	0,8485
7000	19,17808	0,8834
8000	21,91781	0,9097
9000	24,65753	0,9298
10000	27,39726	0,9451

Os resultados indicam uma vida média (*mean life*) dos poços produtores de óleo de 3.089,41 dias, correspondendo a 8,464 anos, ou 8 anos e 5 meses, aproximadamente.

Os valores aproximados das taxas de falhas para alguns tempos de vida são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3.: Taxa de falhas para alguns tempos de vida

Tempo (Dias)	Tempo (Anos)	Taxa de Falha
20	0,05479	0,00060
50	0,13699	0,00060
100	0,27397	0,00050
200	0,54795	0,00050
300	0,82192	0,00040
365	1,00000	0,00040
400	1,09589	0,00040
500	1,36986	0,00040
1000	2,73973	0,00040
1500	4,10959	0,00030
2000	5,47945	0,00030
3000	8,21918	0,00030
4000	10,95890	0,00030
5000	13,69863	0,00030
10000	27,39726	0,00020

Baseado nos resultados supracitados para os poços produtores de óleo, de maneira global, pode-se extrair as seguintes informações relevantes:

1. Taxa de falha decrescente com o tempo, conforme o parâmetro de forma $\beta = 0,8428$, que é menor que um. Isto pode ser verificado na figura 4.11 e na tabela 4.3. Isto significa que esta população apresenta características de mortalidade infantil ou de falhas prematuras, com taxa de falha em declínio. As falhas prematuras, de uma maneira geral, manifestam-se por falhas causadas por defeitos de fabricação de materiais, utilização de materiais inadequados e por falhas na inspeção. Mas no campo em estudo os dados coletados não indicam exatamente isto, já que não há muitos registros de falhas de materiais. As principais causas estão relacionadas a problemas de obstrução por parafinas nas linhas ou por hidrato nos blocos das Árvores de Natal Molhada (ANM), ou seja, problemas de escoamento;
2. Vida característica, que é o parâmetro de escala, representado por η na figura 4.1, de 2.824,4936 dias, correspondendo a 7,74 anos. Esta vida característica

indica que 63,2% destes poços podem falhar neste período e que 36,8% dos poços podem produzir por mais de 7,74 anos sem quaisquer falhas;

3. Vida média (*mean life*) dos poços de 3.089,41 dias, correspondendo a 8,464 anos, ou 8 anos e 5 meses, aproximadamente;
4. A vida característica dos poços apresenta tendência ascendente em relação ao tempo, significando que o produto poço foi sendo construído com melhor qualidade ao longo do tempo. Isto pode ser comprovado pelo histórico do campo em estudo até 1999 (Accioly & Martins, 1999). Os dados constam da tabela 4.4:

Tabela 4.4.: Evolução da vida característica

Ano	Vida Característica (anos)
2003	7,74
1999	6,73
1998	4,47
1997	2,68
1996	1,41
1995	1,72

Isto também pode ter a seguinte explicação adicional: um grande número de poços entrou em produção, ou seja, houve um crescimento populacional acentuado no período. Estes poços, por serem jovens, ainda não sofreram a primeira intervenção.

4.4.2 Competição Entre Modos de Falhas (*Competing Failure Modes*)

No item anterior, analisamos os dados de falhas e de vida dos poços produtores de uma forma global, ou seja, todos os poços produtores. Agora vamos nos deter nas falhas individuais ou grupais, Isto é, vamos separar os motivos geradores que levaram a interrupção das operações de produção. Estes motivos ou causas foram catalogados conforme explicado no capítulo anterior.

Freqüentemente, um grupo de poços falha devido a mais de uma causa geradora de falha. Vale ressaltar neste ponto que uma das premissas assumidas anteriormente é que após a intervenção, o poço retorna à produção normal de óleo

“como se fosse novo”. Isto porque, na maioria dos casos, substitui-se não apenas o equipamento defeituoso, mas também outros equipamentos que após a desmontagem, reentrada no poço, devem ser obrigatoriamente substituídos ou rigorosamente inspecionados.

Um poço petrolífero é um sistema altamente complexo, não sendo adequada a sua comparação a um simples produto do mercado. Intuitivamente, pode-se concluir que os poços podem falhar devido a quaisquer causas possíveis.

Segundo a literatura, a análise por competição entre modos de falhas é aplicável somente a componentes não reparáveis ou substituíveis. Outro ponto importante é que, quando um elemento falha, todo o sistema falha. Isto também foi uma premissa adotada anteriormente para o sistema poço. No caso em estudo, o que chamamos de componente é uma entidade complexa: é o próprio sistema poço. É claro que ao falar em substituir, estamos simplificando a modelagem. Entretanto, ao intervir no poço, diversos componentes são substituídos ou não, dependendo da situação. Isto equivale a dizer que o poço torna-se novo outra vez, exceto do ponto de vista do reservatório. Mas, mesmo assim, durante uma intervenção pode-se mudar de zona de interesse, ou seja, de reservatório. Além disto pode-se intervir no reservatório a ponto de alterarmos as suas características originais através de uma estimulação de grande porte. Neste caso, podemos considerar que o reservatório não é mais o original desde do início da produção. Diante do exposto podemos concluir que o sistema poço merece um tratamento bastante diferenciado em relação aos demais sistemas.

Portanto, a análise por competição entre modos de falha deve ser aplicada quando os mecanismos de falha são completamente independentes e a primeira falha acarreta a falha de todo o sistema. Neste cenário, os modos ou causas de falhas “competem entre si” para “tentar” falhar todo o sistema. Isto pode ser visto como um modelo de confiabilidade de sistema em série, no qual cada modo ou causa de falha seja representado por um bloco.

A análise de competição entre modos ou causas de falhas segrega a análise das causas de falhas e depois combina os resultados para fornecer um modelo representativo do produto em questão, o sistema poço.

Para analisar sistemas que tenham mais de modo de competição entre causas de falhas, é necessário realizar uma análise separada para cada causa de falha. Durante cada análise, os tempos até as falhas para todas as outras causas ou modos de falhas não analisadas são consideradas como censuradas. Isto porque os poços em questão podem falhar, em algum tempo no futuro, devido à causa ou modo de falha que está em análise no momento, considerando que as demais causas, não analisadas, não tenham ocorrido. Neste caso, a informação disponível é que a causa ou modo de falha em questão não ocorreu e que o poço considerado não sofreu falha devido à causa ou modo de falha em análise, isto é, sofreu uma censura devido àquela causa (Reliasoft, 2000).

Uma vez que a análise separada para cada causa de falha tenha sido realizada, usando os princípios supracitados, a equação da confiabilidade resultante de todas as causas de falhas é o produto da equação de confiabilidade para cada causa. Isto foi expresso anteriormente pela equação 2.3.:

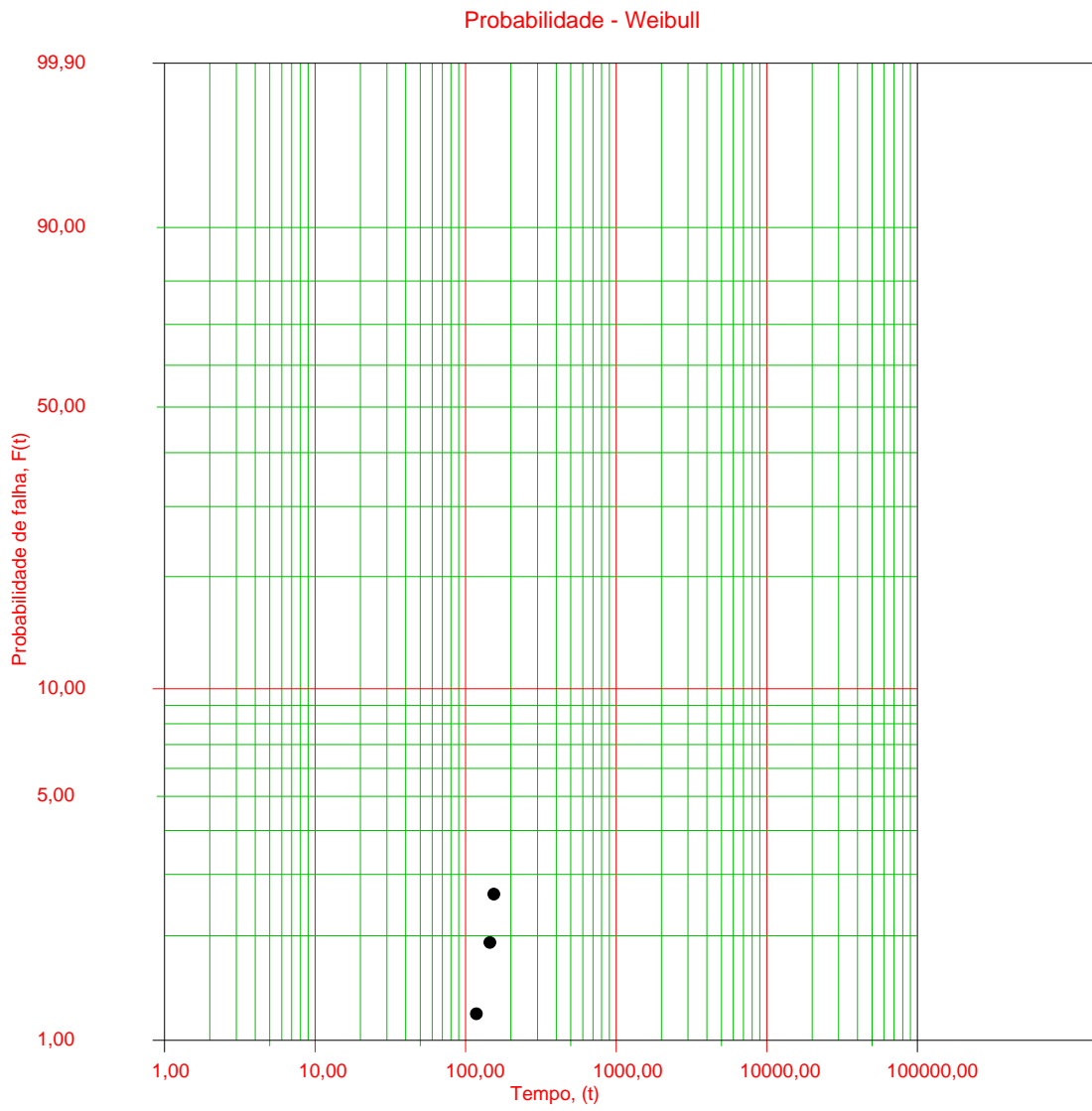
$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot \dots \cdot R_n(t).$$

onde n é o número total de causas ou modos de falhas considerados. Esta é a regra para a confiabilidade de sistemas em série com componentes estatisticamente independentes. Conforme citado anteriormente, isto significa que para um sistema formado de vários componentes independentes, em série, a confiabilidade do sistema é menor que a confiabilidade de quaisquer de suas partes (Meyer, 1984). Devemos observar que na expressão anterior (equação 2.3), $R_i(t)$ é a função de confiabilidade baseada em qualquer distribuição de tempo de vida assumida. Neste trabalho, após a comparação entre as diversas distribuições de vida, escolheu-se a distribuição de Weibull com dois parâmetros.

Neste ponto cabe ressaltar que a taxa de falha do sistema poço é, simplesmente, a soma das taxas de falhas das causas ou modos de falhas, conforme NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (2003).

Portanto, vamos proceder à análise separada para as principais causas geradoras ou modos de falha para os poços produtores, considerando as demais

causas de falhas como censuradas. Esta análise engloba o cálculo dos parâmetros e a representação gráfica dos resultados. Os resultados são apresentados nas figuras 4.14 a 4.20, respectivamente, para as seguintes causas ou modos de falha: hidrato, linhas, Árvore de Natal Molhada (ANM), reservatório, parafina nas linhas, válvula de segurança de sub-superfície (DHSV) e para *gravel pack*.



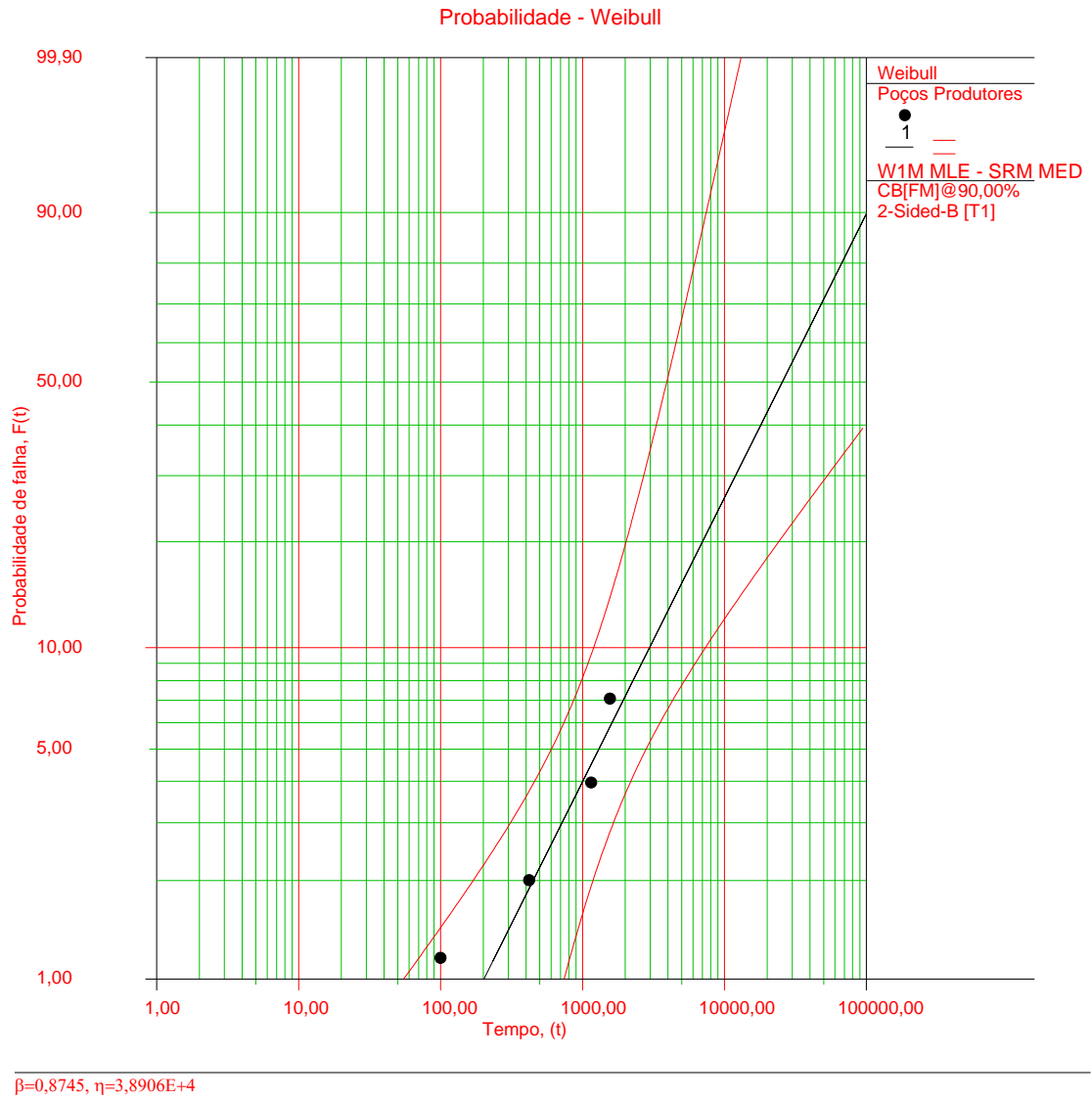


Figura 4.15.: Linhas

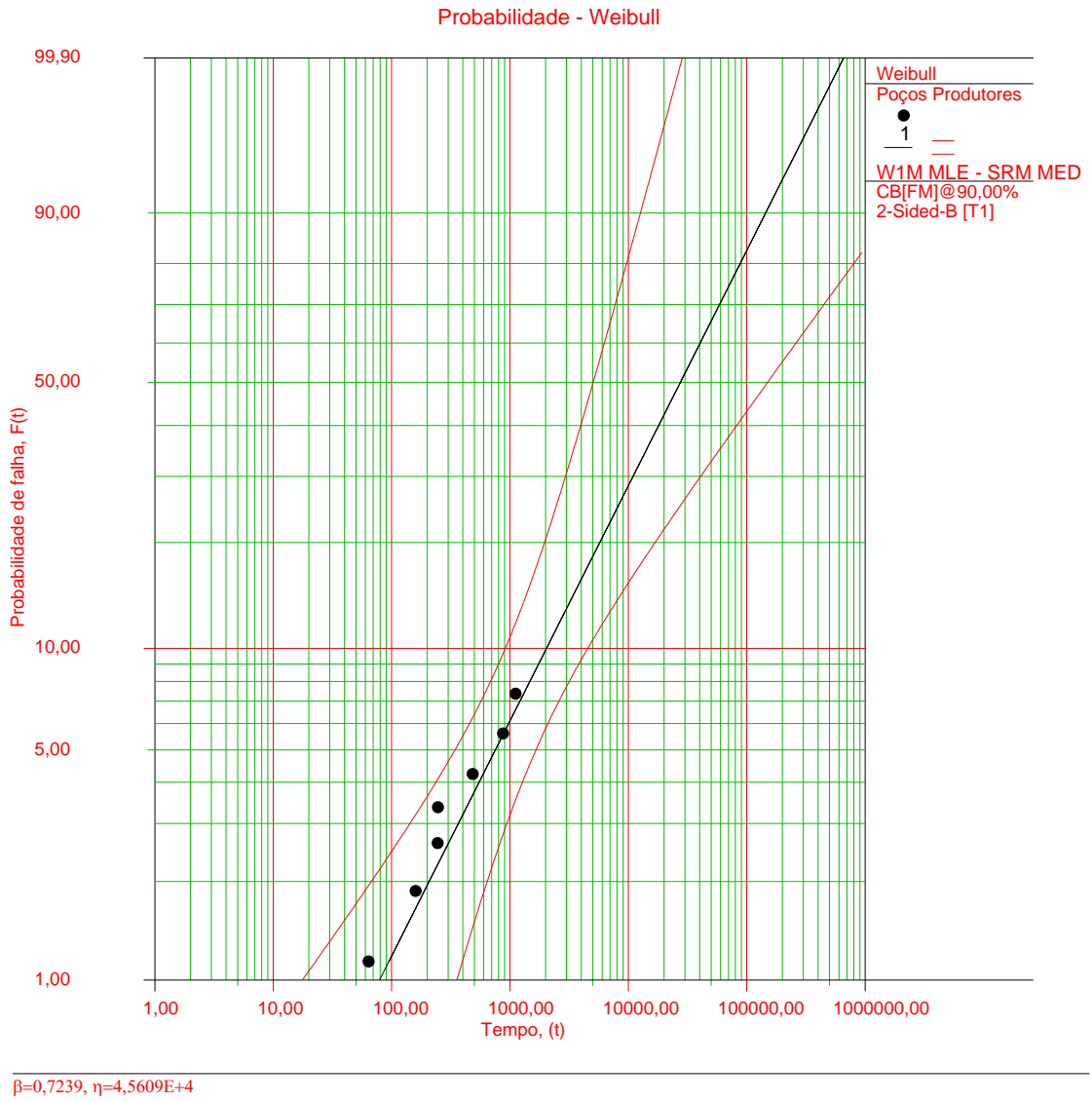


Figura 4.16.: Árvore de Natal Molhada (ANM)

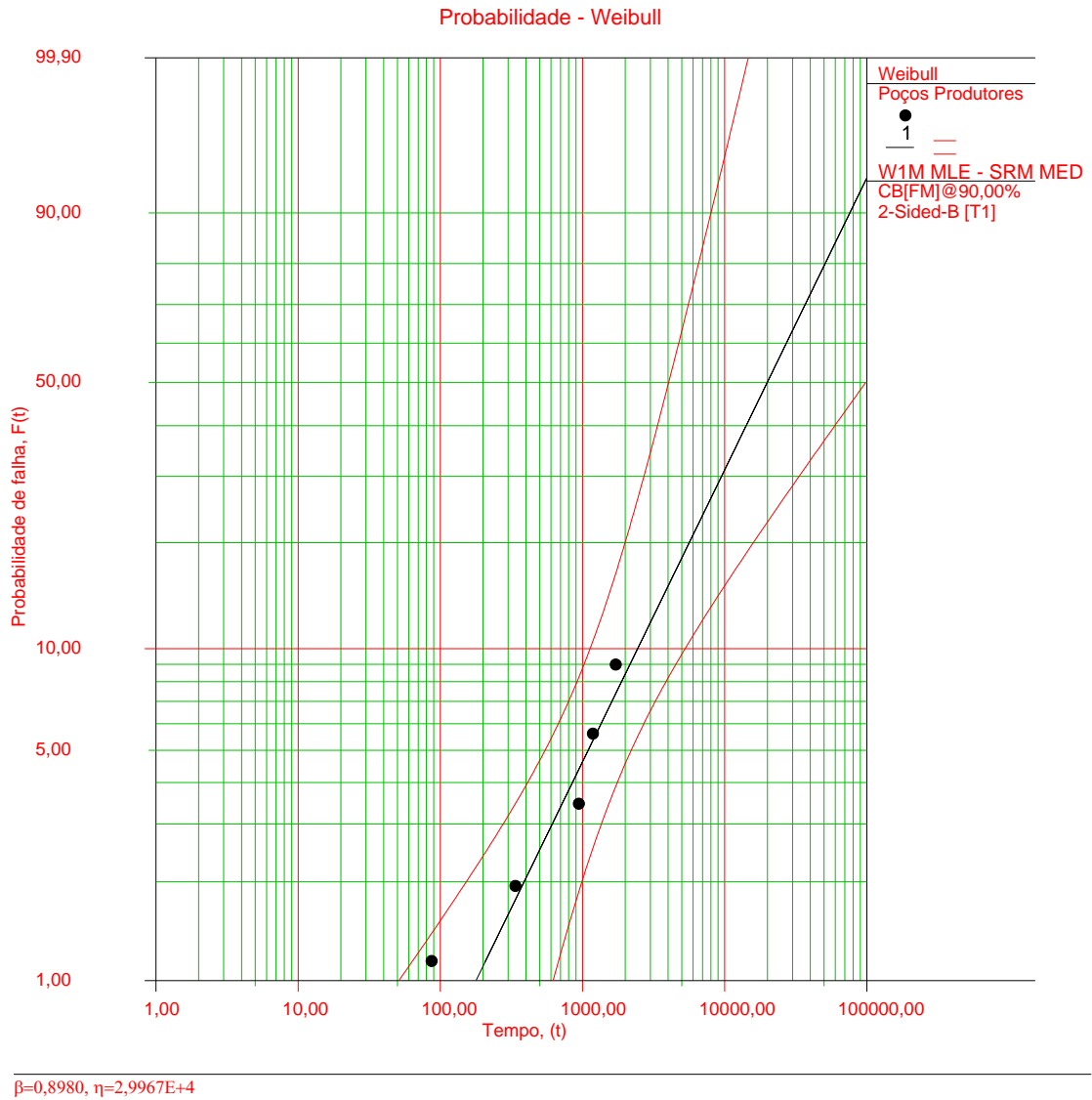
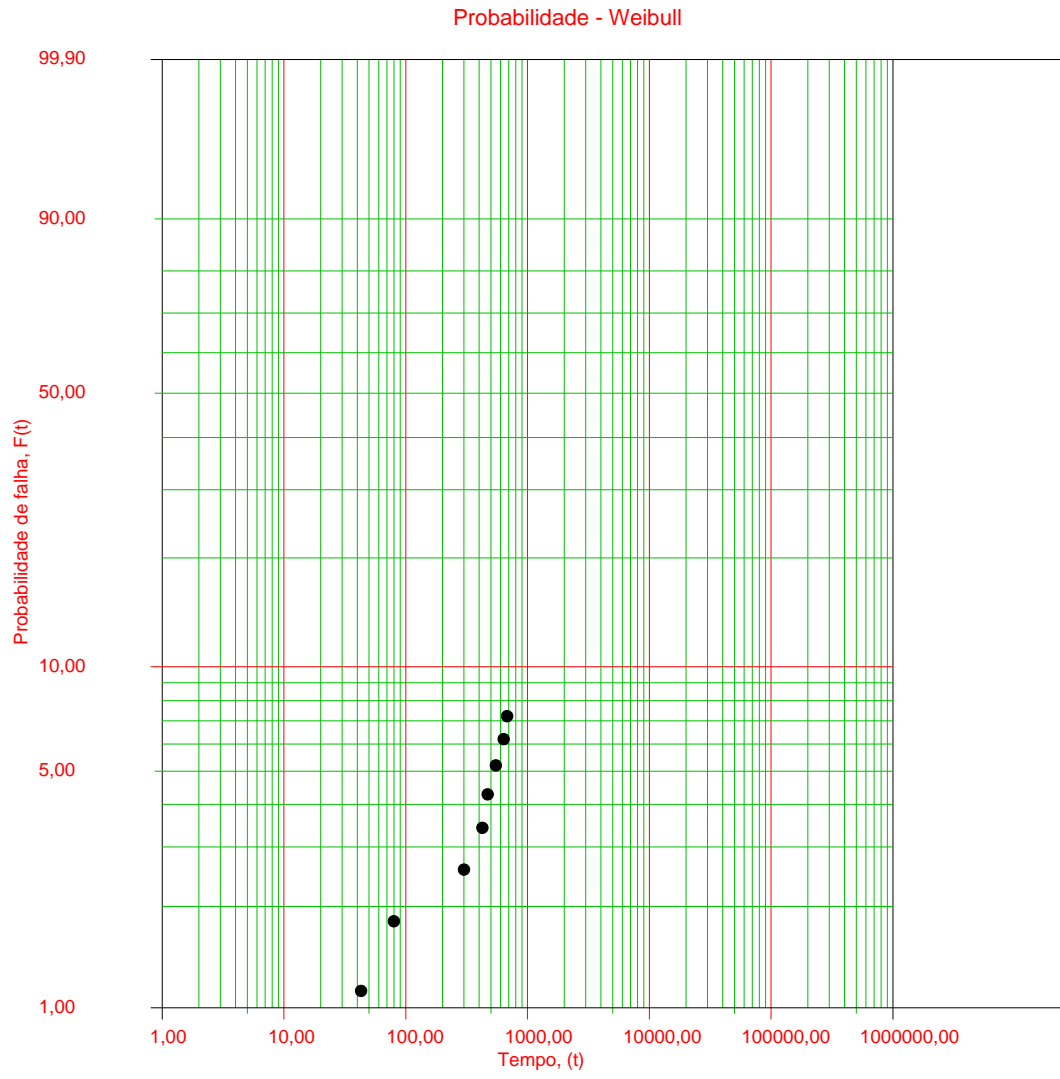


Figura 4.17.: Reservatório



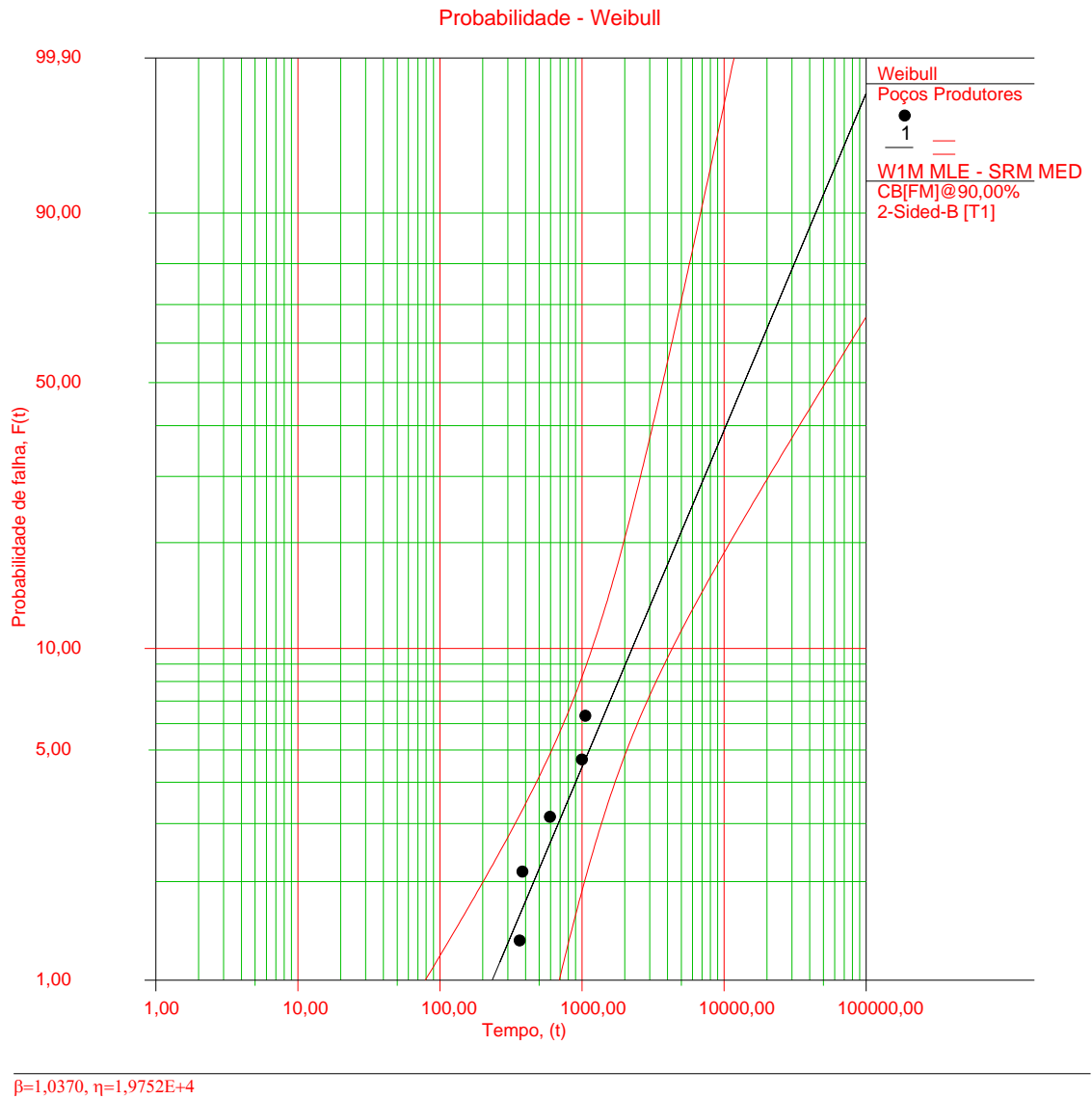
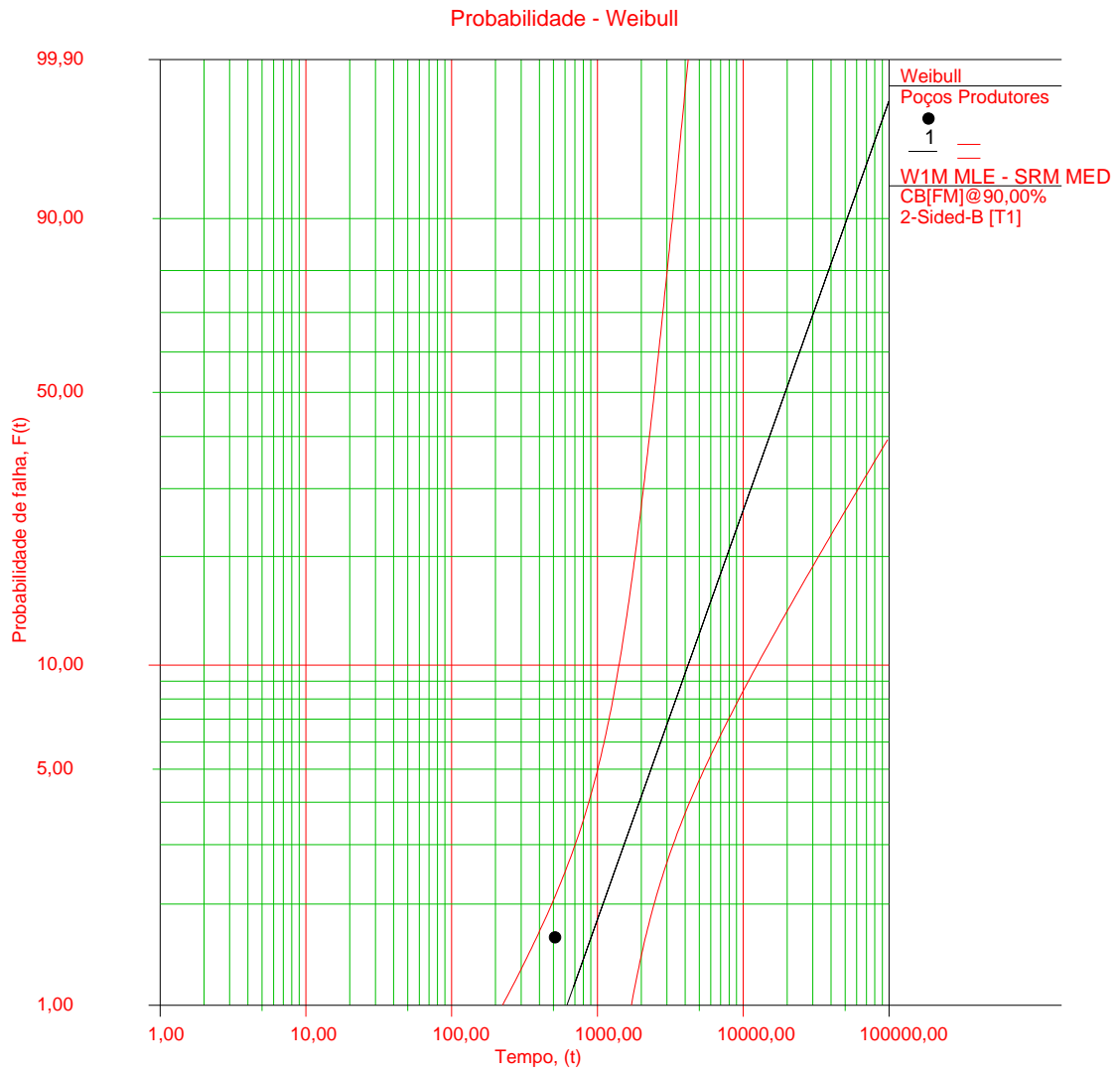


Figura 4.19.: Válvula de segurança de sub-superfície (DHSV)



$\beta=1,2283, \eta=2,6178E+4$

Figura 4.20.: Gravel Pack – Contenção de Areia

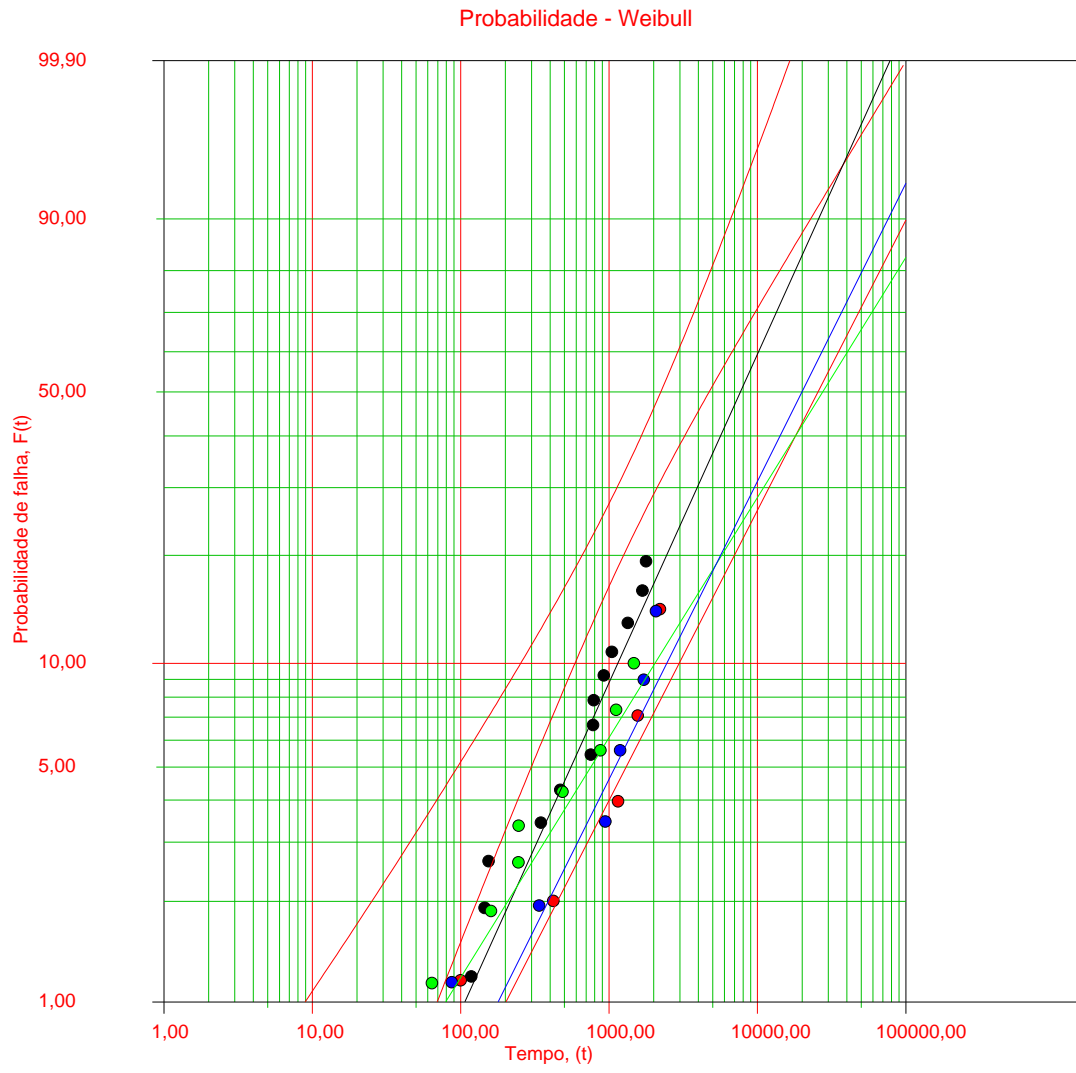
O próximo passo será a comparação entre as principais causas ou modos de falha e o resultado da combinação, que indica a contribuição ou a influência que as principais causas exercem, separadamente, na confiabilidade do sistema poço como um todo. Esta comparação pode ser visualizada na figura 4.21, onde constam os parâmetros calculados e as distribuições para cada causa de falha. Além disso, mostra a distribuição resultante da combinação destas causas de falhas, representada pela reta de cor preta mais à esquerda na figura. Pode-se observar que o perfil da distribuição das três causas de falha, ou seja, hidrato, linhas e reservatório, são praticamente similares. Já o perfil devido a ANM apresenta ligeira diferença. Por esta análise, as três causas de falhas supracitadas são as que exercem influência predominante no comportamento das falhas nos poços produtores. As demais causas de falhas, mesmo sendo importantes, dispõem de menos pontos para sustentar uma análise mais apurada do cenário.

Contudo, existe uma alternativa, talvez mais coerente, para analisar estes resultados. No parágrafo anterior, selecionamos as quatro principais causas geradoras de falhas em poços, não importando a relação entre elas. Agora vamos agrupar todas as causas geradoras de falhas em três categorias de acordo com a correlação entre as mesmas. São os problemas relacionados ao escoamento, falhas mecânicas e reservatório. A tabela 4.5 mostra a classificação adotada.

Tabela 4.5.: Agrupamento das causas de falha

ESCOAMENTO	MECÂNICO	RESERVATÓRIO
Hidrato	ANM	Reservatório
Parafina nas Linhas	DHSV	Estimulação
	Linhas	Gravel Pack
	Revestimento	
	Coluna	

É claro que podemos agrupá-las de outra forma para proceder à análise. Mas, a classificação proposta está bem correlacionada. Os resultados são apresentados na figura 4.22.



Na figura 4.22 constam os parâmetros calculados e as distribuições para cada agrupamento de causa de falha. Além disto, mostra a distribuição resultante da combinação destes agrupamentos, representada pela reta de cor preta mais à esquerda na figura com o intervalo de confiança de 90%. Pode-se observar que os perfis das distribuições dos três agrupamentos de causas de falha são praticamente similares, paralelos. Por esta análise, os problemas relacionados ao escoamento e problemas mecânicos em equipamentos dominam o comportamento das falhas nos poços produtores. Os problemas creditados ao reservatório exercem uma influência menor.

De posse dos resultados das análises realizadas referentes à competição entre as causas ou modos de falhas (*competing failure modes*), podemos traçar o seguinte diagnóstico para o comportamento das falhas nos poços produtores de óleo do campo em estudo:

1. Taxa de falha decrescente em relação ao tempo. Isto se revela tanto de uma maneira agrupada como individual, demonstrado pelos valores dos parâmetros de forma β , em sua maioria menor que um. Os resultados podem ser resumidos na tabela 4.6:

Tabela 4.6.: Comportamento das taxas de falhas

Taxa de Falha Decrescente $\beta < 1$	Taxa de Falha Constante $\beta = 1$	Taxa de Falha Crescente $\beta > 1$
Linhas	Hidrato	Gravel Pack / Cont. areia
Árvore de Natal Molhada (ANM)	DHSV	
Reservatório		
Parafina nas Linhas		

Embora as falhas causadas por hidratos e pelas válvulas de segurança de sub-superfície (DHSV) sejam de naturezas diferentes, os valores do parâmetro de forma β estão no limiar do estado de taxa de falha constante, sendo que o primeiro apresenta uma discreta tendência a ser crescente com o passar do tempo, conforme o aumento da frequência de intervenções registrado nos últimos

anos. Quanto ao segundo, as falhas causadas pela DHSV, os dados indicam uma tendência gradual de queda na taxa de falha com o passar do tempo conforme a baixa frequência de intervenções nos últimos anos. As falhas creditadas ao conjunto *gravel pack* ou sistema de contenção de areia de um modo geral apresentam taxa de falha nitidamente crescente. As demais causas geradoras de intervenções em poços apresentam taxas de falha decrescente;

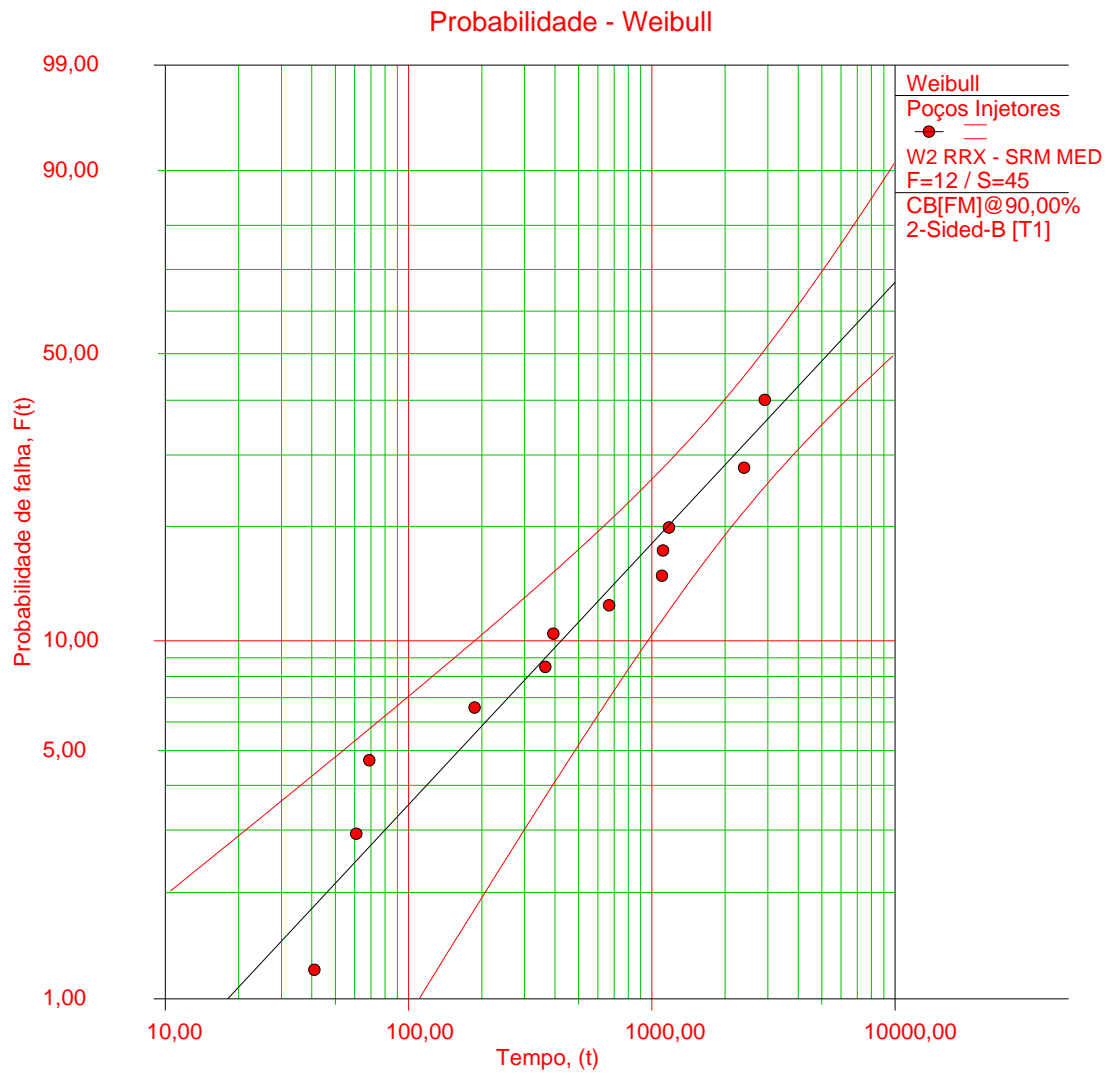
2. O agrupamento das causas geradoras de falhas em categorias segundo as correlações existentes entre si sugere ser mais adequado à análise. Mesmo assim, no cômputo geral, o perfil de comportamento segue a tendência de taxa de falha em declínio.

4.5 ANÁLISE DOS POÇOS INJETORES

Da mesma forma, para a análise dos poços injetores, primeiramente, precisamos definir a distribuição de probabilidade que é mais adequada para descrevermos os dados observados. A etapa seguinte será a obtenção das probabilidades de falha além da forma da função taxa de falhas.

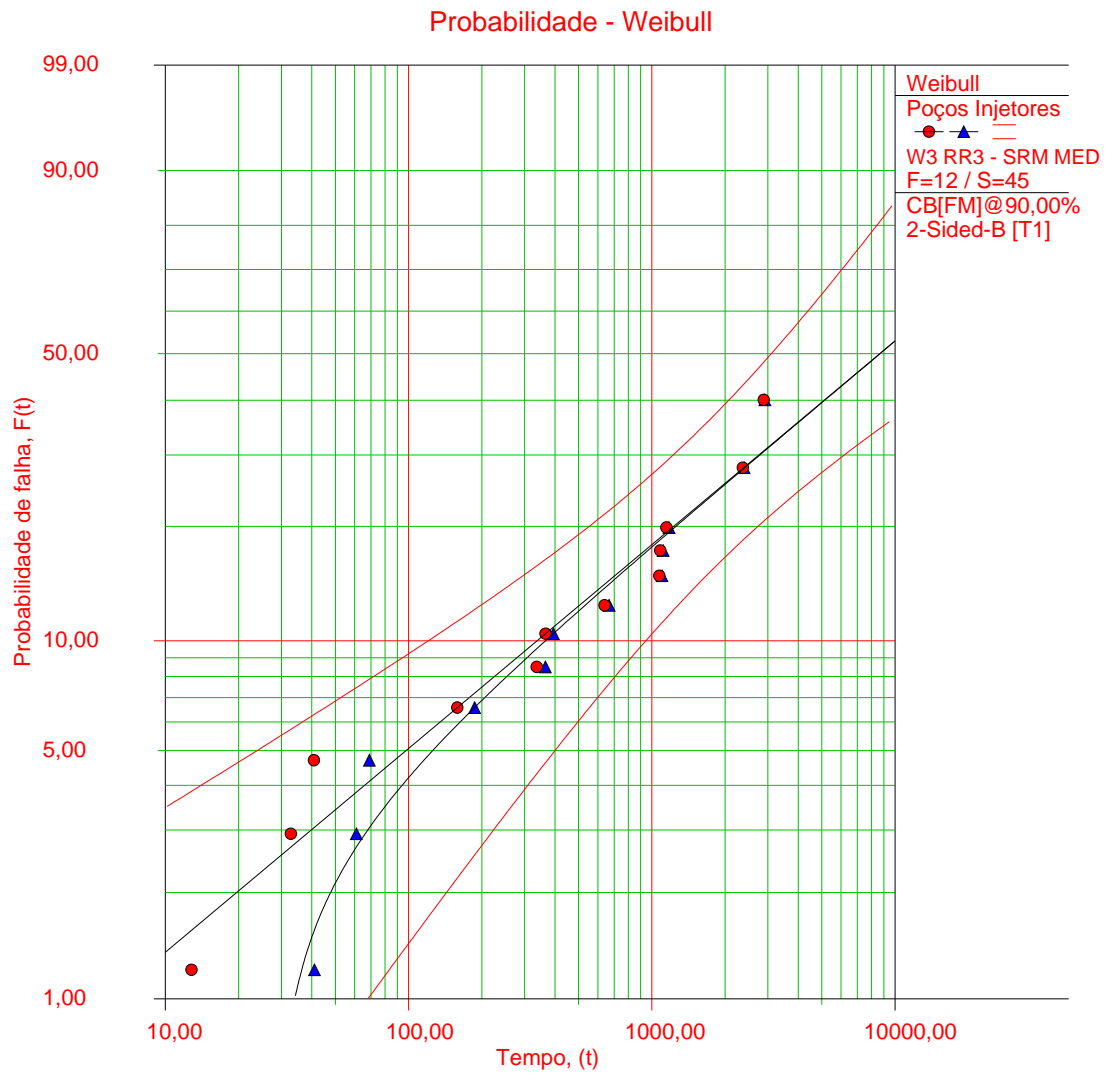
O primeiro passo é analisar a adequação do ajuste para as distribuições que são, geralmente, utilizadas na literatura para modelar tempos de vida. Os ajustes para seis tipos diferentes de distribuições de probabilidade são apresentados nas figuras 4.23. a 4.28. Após análise dos resultados, podemos concluir que os modelos que são mais adequados aos dados são o exponencial com 2 parâmetros, Weibull com 2 parâmetros, Weibull com 3 parâmetros e o lognormal.

A tabela 4.7 apresenta a classificação dos resultados das distribuições em função do melhor ajuste para descrição dos dados observados com seus respectivos valores encontrados utilizando-se o método da máxima verossimilhança.



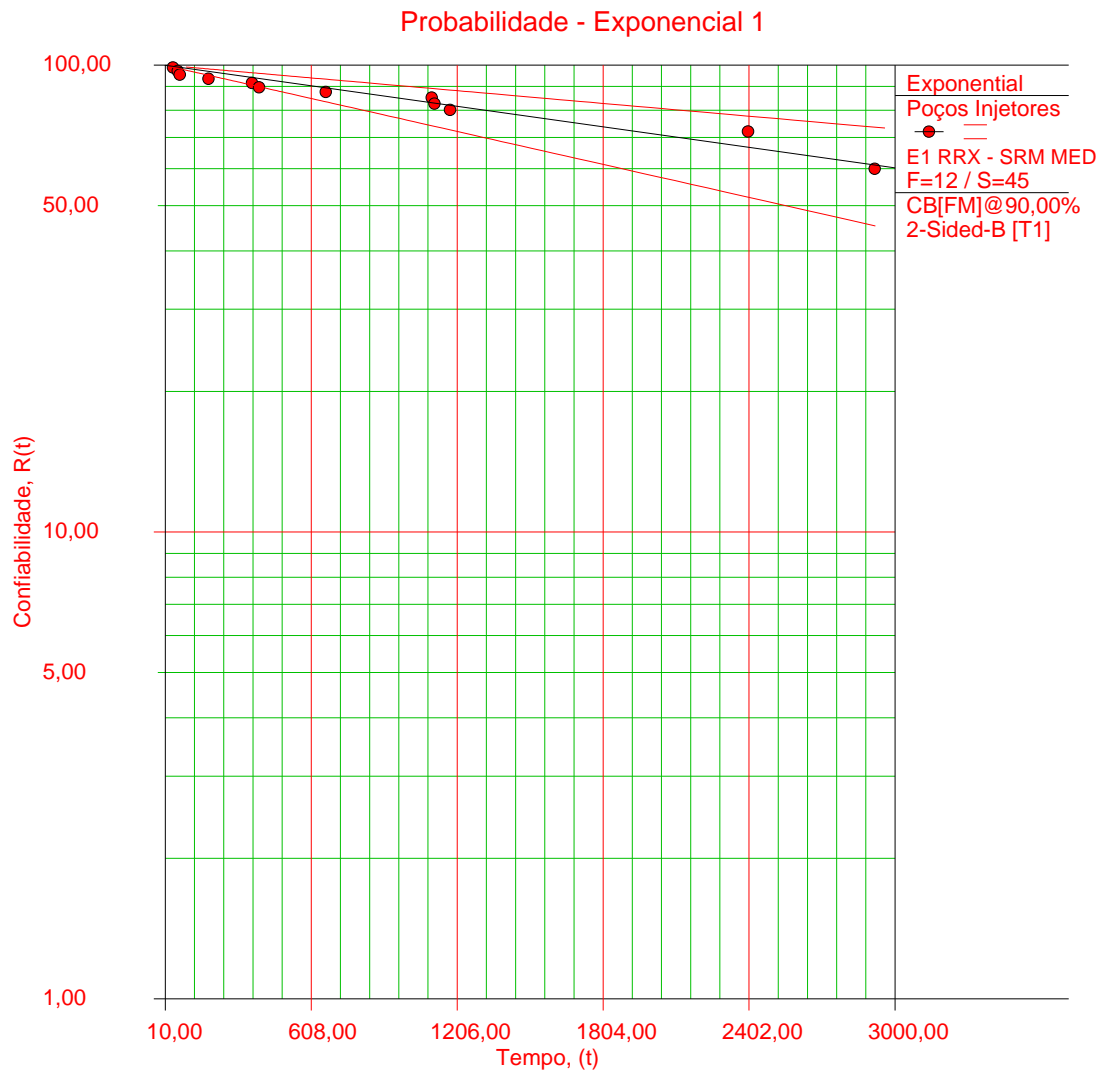
$\beta=0,7442$, $\eta=8731,9831$, $\rho=0,9711$

Figura 4.23.: Ajuste dos dados para a distribuição Weibull com 2 parâmetros



$\beta=0,5806$, $\eta=1,6287E+4$, $\gamma=28,1850$, $\rho=0,9790$

Figura 4.24.: Ajuste dos dados para a distribuição Weibull com 3 parâmetros



$\lambda=0,0002, \rho=-0,9692$

Figura 4.25.: Ajuste dos dados para a distribuição Exponencial com 1 parâmetro

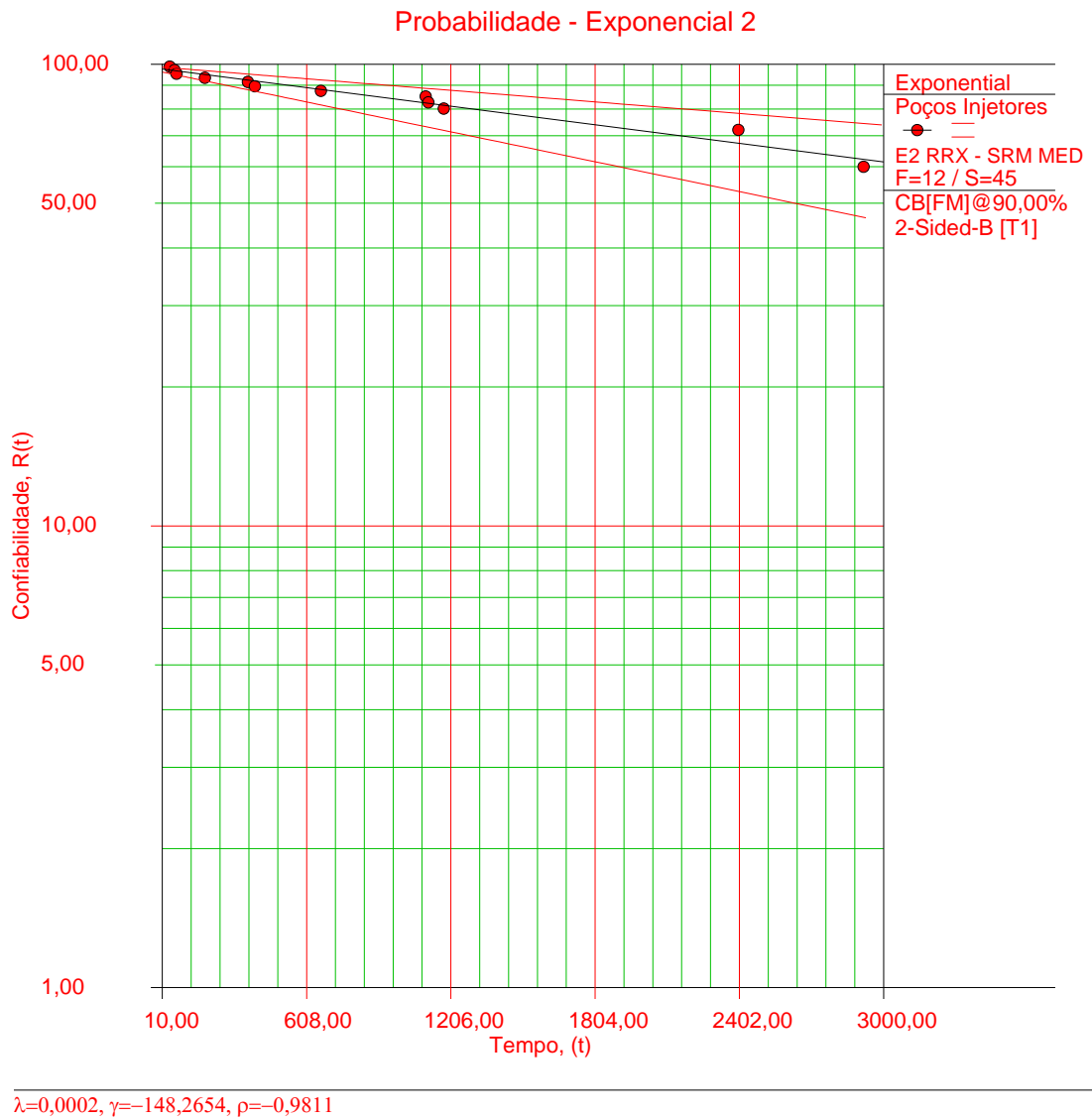


Figura 4.26.: Ajuste dos dados para a distribuição Exponencial com 2 parâmetros

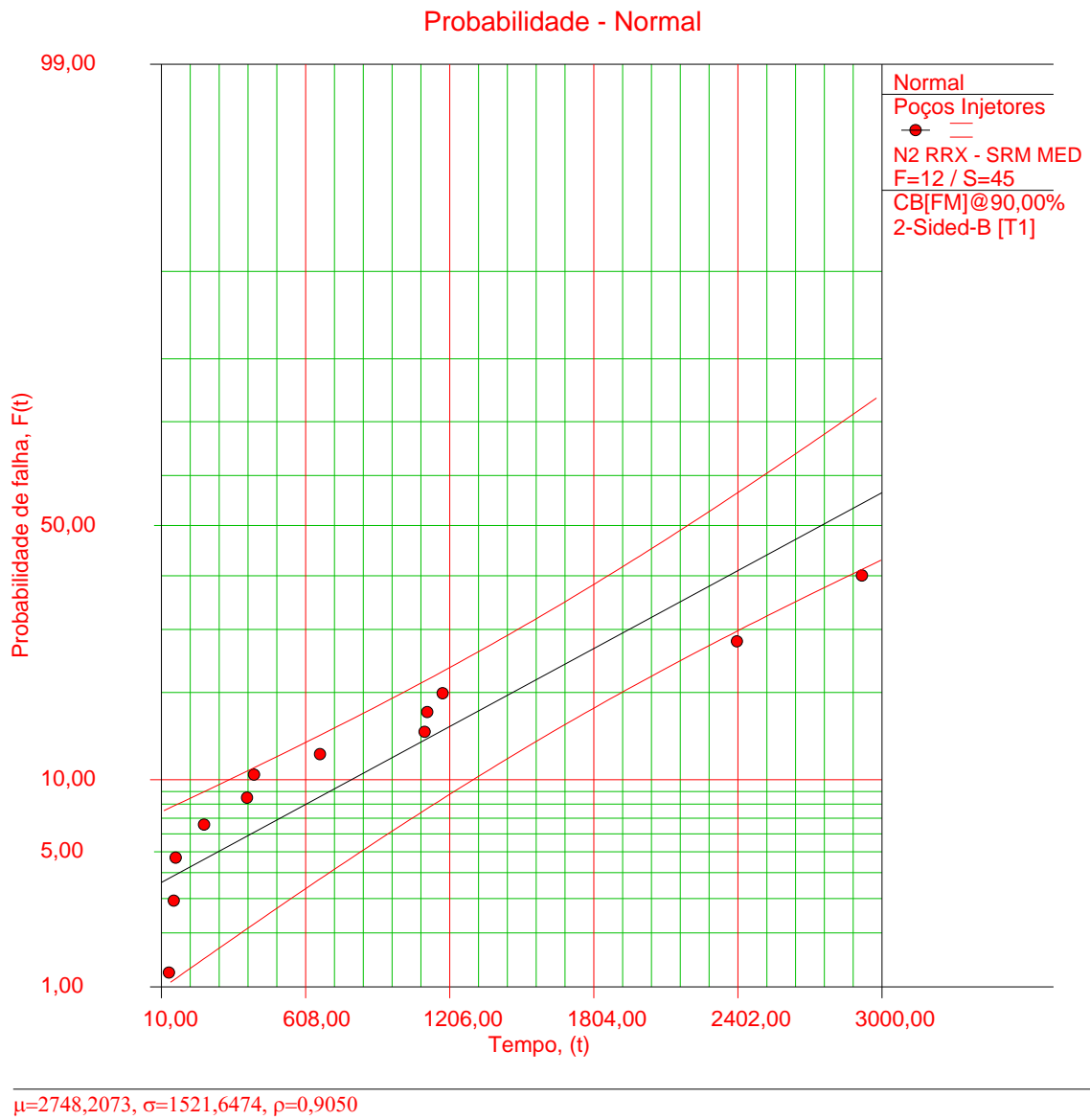


Figura 4.27.: Ajuste dos dados para a distribuição Normal

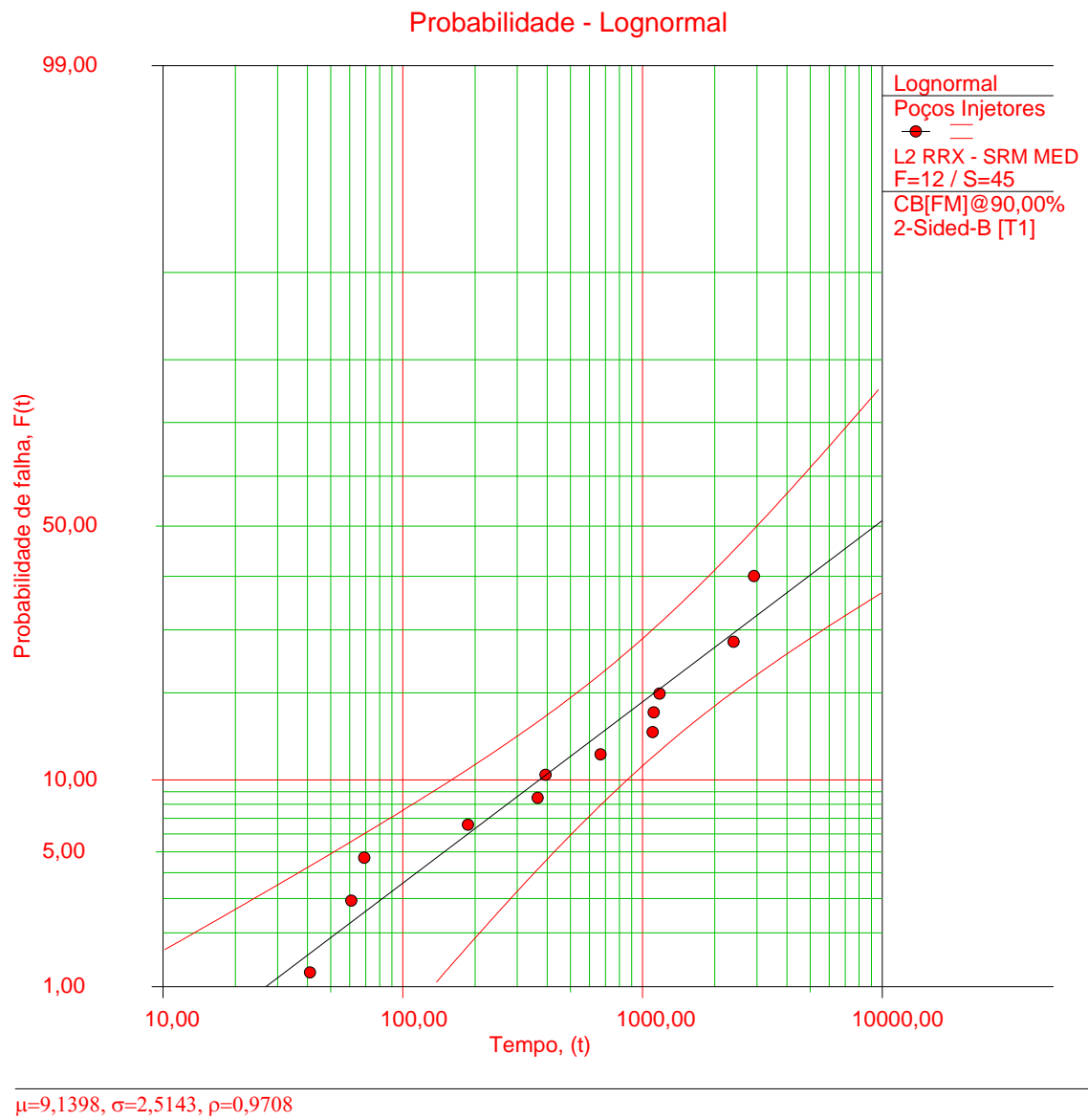


Figura 4.28.: Ajuste dos dados para a distribuição Lognormal

Tabela 4.7.: Ajuste dos parâmetros e valores de máxima verossimilhança

DISTRIBUIÇÃO	RANKING	MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA
Exponencial 1	5	- 117,36967
Exponencial 2	1	- 118,62829
Normal	6	- 123,64620
Lognormal	4	- 116,71493
Weibull 2	2	- 116,73530
Weibull 3	3	- 115,70447

Conforme citado anteriormente, os resultados gráficos e os valores de verossimilhança encontrados indicam que os melhores modelos são, respectivamente, o exponencial com 2 parâmetros e o Weibull com 2 parâmetros. Contudo, não há uma diferença significativa entre os dois modelos. Considerando estas diferenças desprezíveis, adotaremos o modelo de Weibull com 2 parâmetros para a análise dos dados de falhas e tempo de vida dos poços injetores do campo em estudo, utilizando o método da máxima verossimilhança. Além disto, também, esta distribuição tem sido mais empregada na literatura para este tipo de análise.

4.5.1 Ajuste de Weibull Para os Poços Injetores

O ajuste de Weibull, com 2 parâmetros, obtido para os poços injetores está representado, graficamente, na figura 4.23. Os parâmetros encontrados para este modelo de Weibull foram: parâmetro de forma 0,7442 e parâmetro de escala 8731,9831.

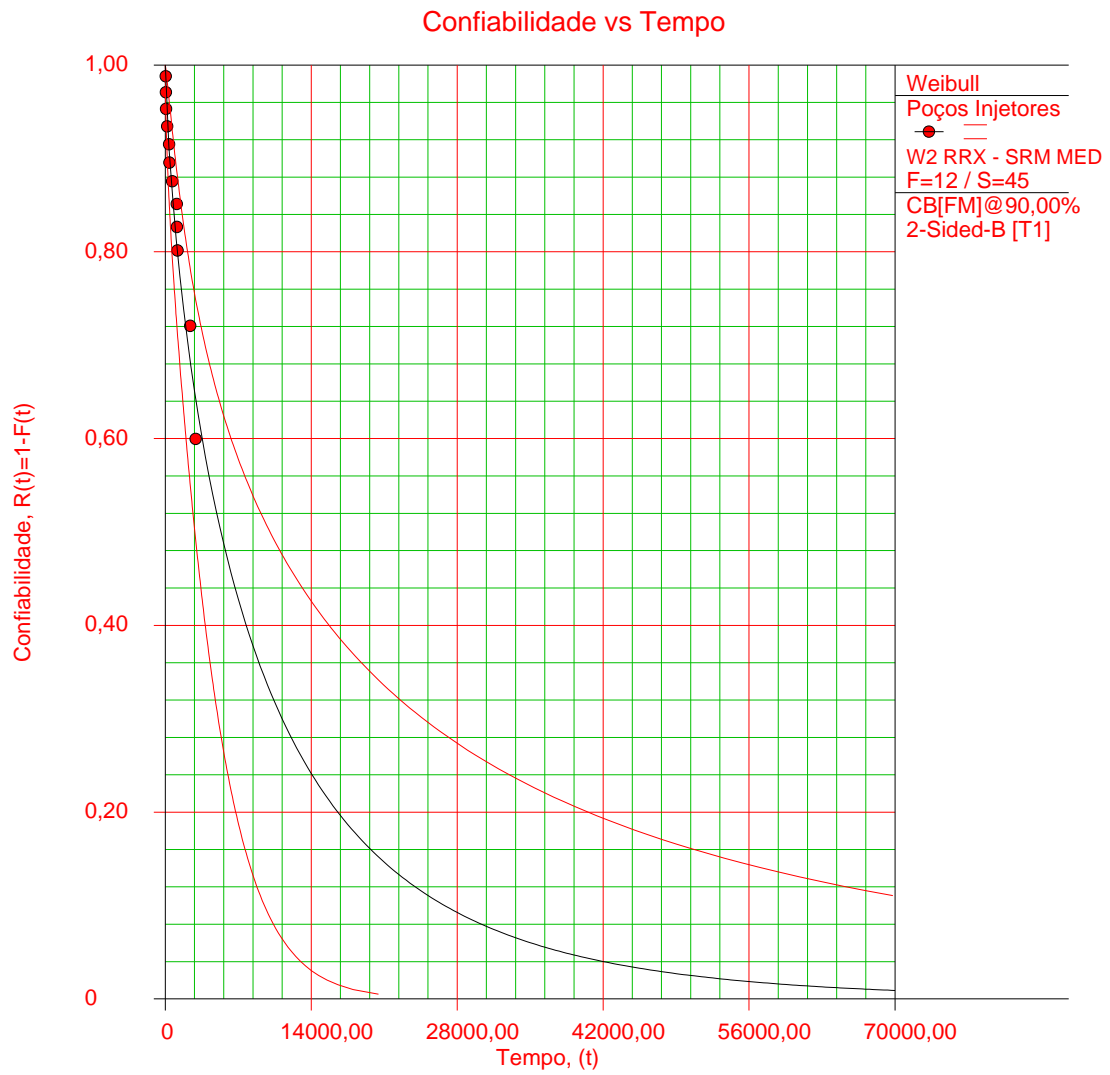
Quando o parâmetro de forma é menor que um, os dados indicam um comportamento da taxa de falhas como sendo decrescente em relação ao tempo. Observamos pelo ajuste que os dados de falha correspondentes às falhas prematuras tem um comportamento não totalmente representado ou definido pelo modelo. A partir de 200 dias os dados apresentam uma aderência melhor ao modelo ajustado, mesmo com um menor número de pontos. Mesmo não sendo o escopo deste trabalho, para estas falhas prematuras, correspondente ao início de operação

do projeto, uma alternativa viável seria o ajuste utilizando um modelo específico representativo, que não será apresentado neste trabalho.

As figuras 4.29 a 4.34 apresentam os resultados gráficos, respectivamente, para: confiabilidade X tempo, probabilidade de falha X tempo, função densidade de probabilidade (Pdf), taxa de falha em função do tempo, superfície de contorno e, finalmente, o método da máxima verossimilhança.

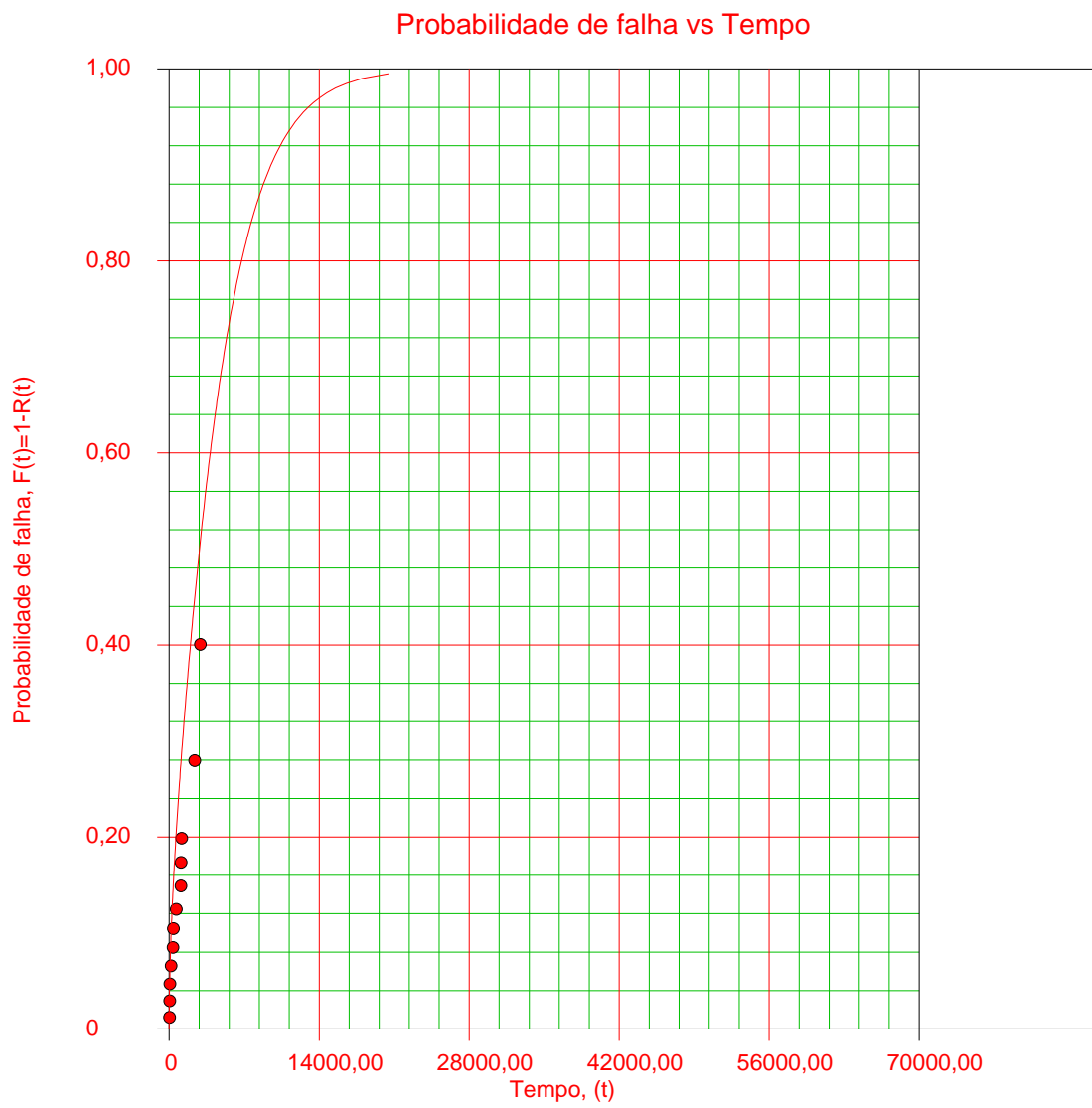
A figura 4.32 apresenta a função taxa de falhas para o ajuste obtido. Nela podemos notar que, inicialmente, dispomos de valores maiores de taxa de falhas que, posteriormente, sofrem uma queda.

A tabela 4.8 apresenta as estimativas das probabilidades de falhas até os tempos estabelecidos, ou tempos de vida. Esta tabela mostra que temos, aproximadamente, 3,53% de probabilidade de termos uma falha nos primeiros 100 dias de vida de um poço injetor. Uma outra informação importante é que temos apenas 18% de probabilidade de falha de um poço com menos de 1.000 dias. Da mesma forma, considerando o período de um ano, 365 dias, temos uma probabilidade de falha em um poço injetor de água de 8,9% e assim, sucessivamente, temos diversas probabilidades de falhas em poços injetores com seus respectivos tempos de vida.



$\beta=0,7442, \eta=8731,9831, \rho=0,9711$

Figura 4.29.: Confiabilidade em função do tempo



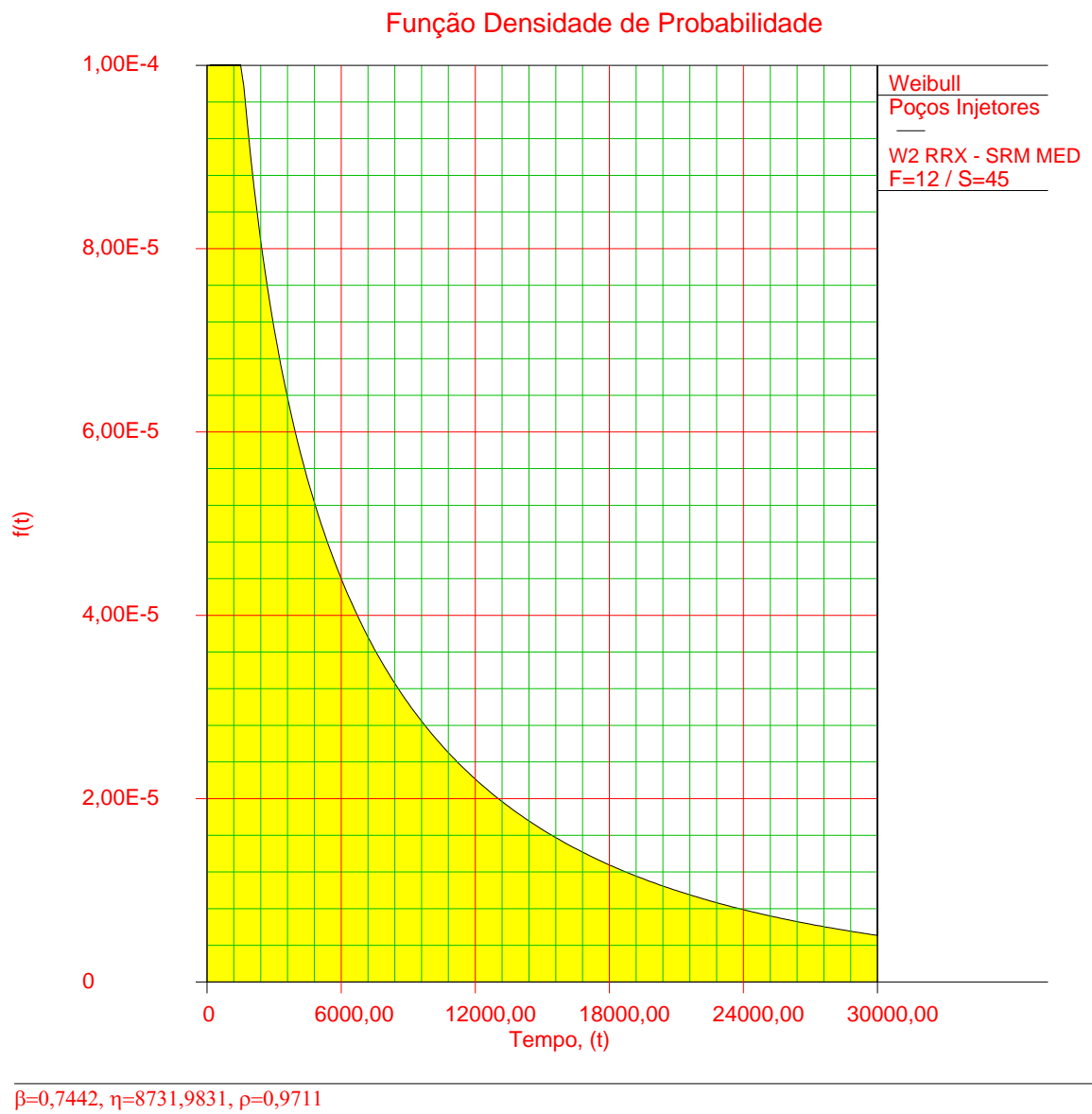
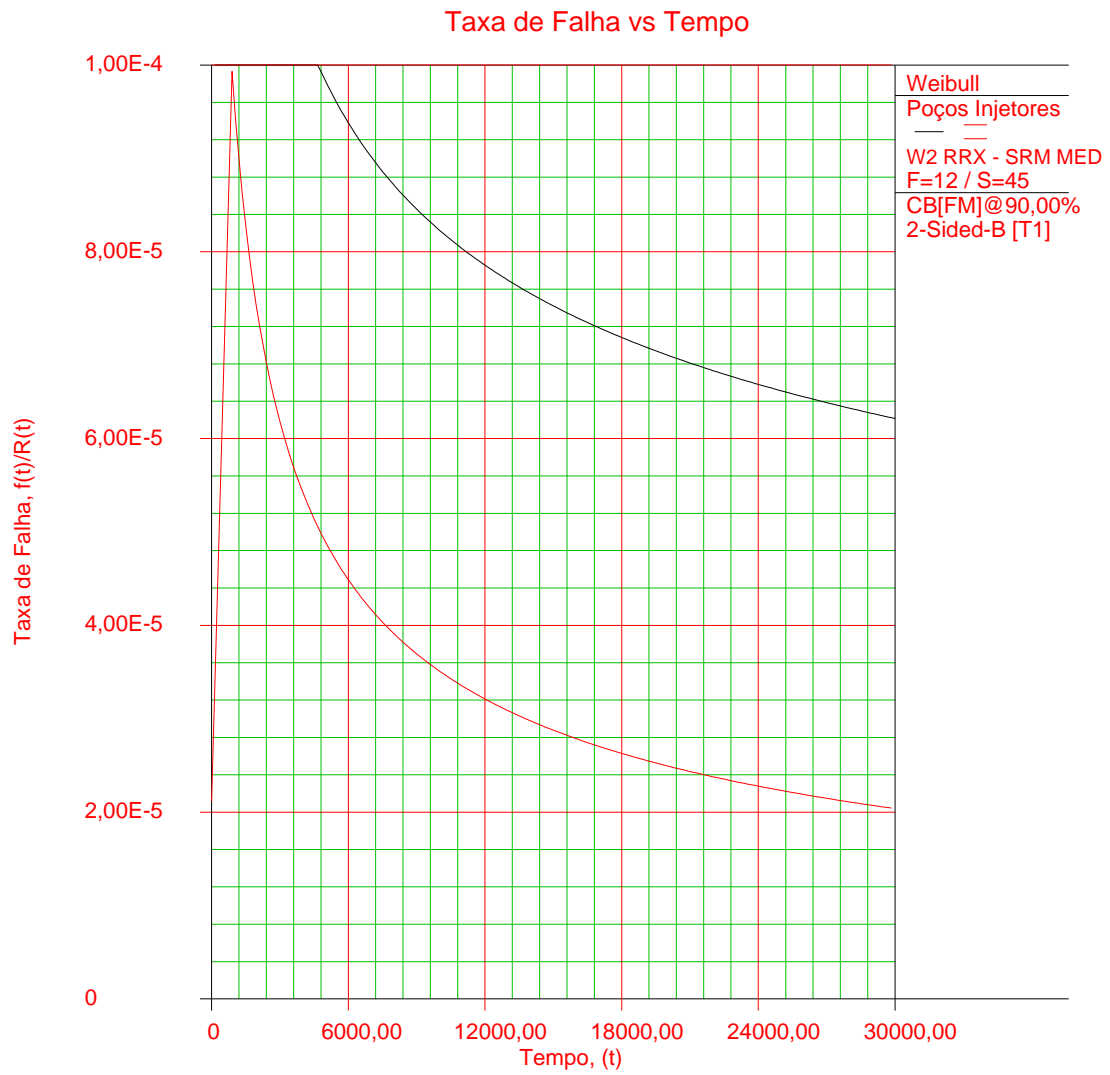


Figura 4.31.: Função densidade de probabilidade (FDP)



$\beta=0,7442, \eta=8731,9831, \rho=0,9711$

Figura 4.32.: Função taxa de falha

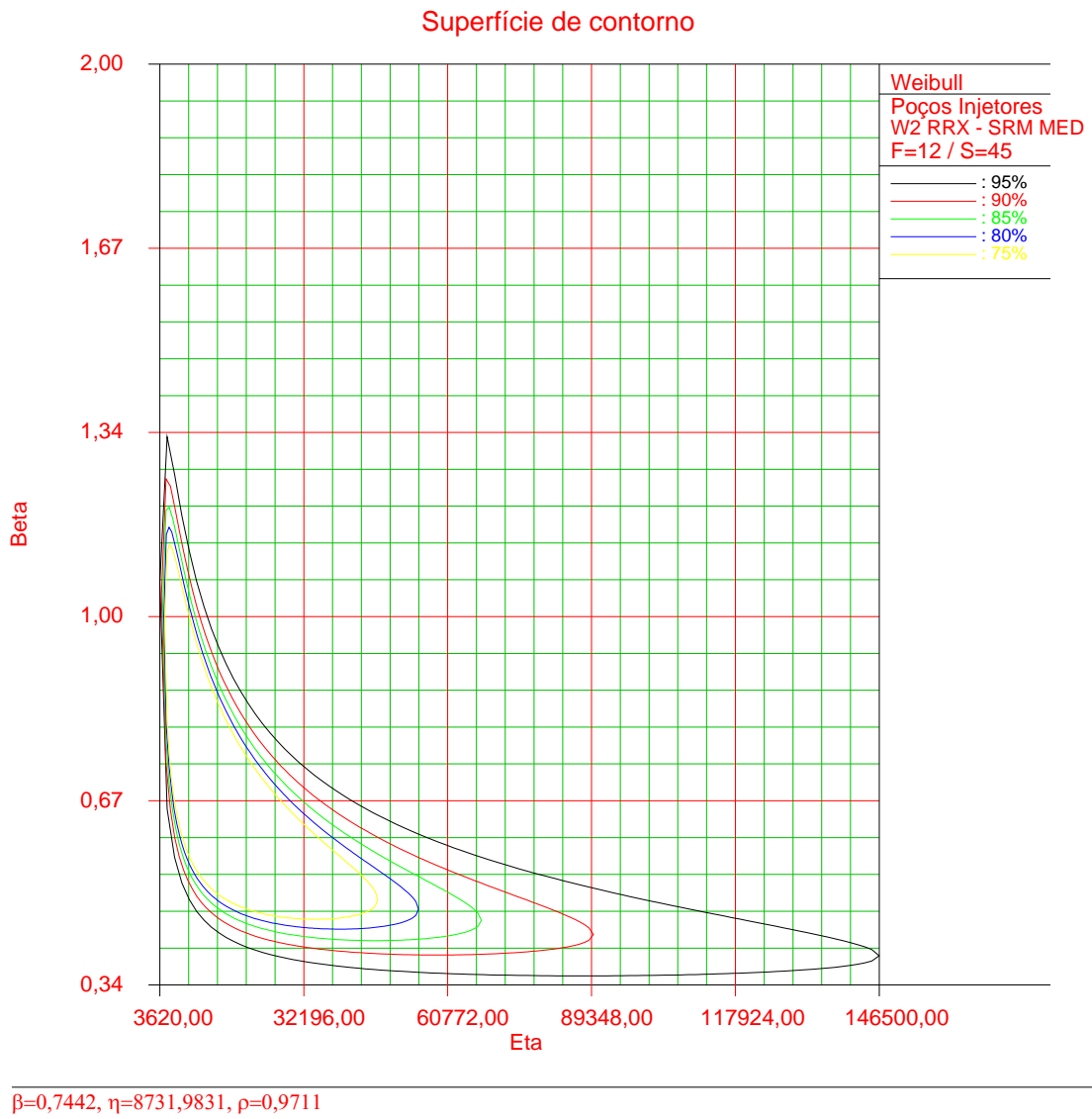


Figura 4.33.: Superfície de contorno

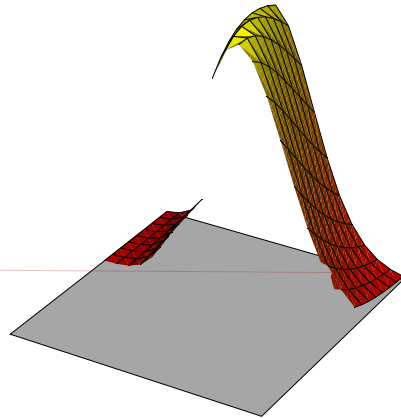


Tabela 4.8.: Estimativas das probabilidades de falhas

Tempo (Dias)	Tempo (Anos)	Probabilidade
20	0,05479	0,0108
50	0,13699	0,0212
100	0,27397	0,0353
200	0,54795	0,0584
300	0,82192	0,0782
365	1,00000	0,0899
400	1,09589	0,0959
500	1,36986	0,1122
600	1,64384	0,1274
700	1,91781	0,1418
800	2,19178	0,1554
900	2,46575	0,1683
1000	2,73973	0,1807
1500	4,10959	0,2363
2000	5,47945	0,2839
2500	6,84932	0,3258
3000	8,21918	0,3634
3500	9,58904	0,3974
4000	10,95890	0,4284
4500	12,32877	0,4570
5000	13,69863	0,4834
6000	16,43836	0,5306
7000	19,17808	0,5719
8000	21,91781	0,6082
9000	24,65753	0,6404
10000	27,39726	0,6692

Os resultados indicam uma vida média (*mean life*) dos poços injetores de água de 10.464 dias, correspondendo a 28,6 anos. Obviamente trata-se uma vida média bastante elevada, certamente uma visão muito otimista, talvez fora da realidade diante do pequeno número de falhas em relação ao grande número de poços que ainda não sofreu alguma intervenção. A maior parte dos dados de falha nos poços injetores foi censurado porque a grande maioria ainda não havia falhado.

Os valores aproximados das taxas de falhas para alguns tempos de vida são apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9.: Taxa de falhas para alguns tempos de vida

Tempo (Dias)	Tempo (Anos)	Taxa de Falha
20	0,05479	0,00040
365	1,00000	0,00020
1000	2,73973	0,00010
2000	5,47945	0,00010
3000	8,21918	0,00010

Baseado nos resultados supracitados para os poços injetores de água, de maneira global, pode-se extrair as seguintes informações relevantes:

- 1- Taxa de falha decrescente com o tempo, conforme o parâmetro de forma $\beta = 0,7442$, que é menor que um. Isto pode ser verificado na figura 4.23 e na tabela 4.9. Isto significa que esta população, assim como a dos poços produtores, apresenta características de mortalidade infantil ou de falhas prematuras, com taxa de falha em declínio.
- 2- Vida característica, que é o parâmetro de escala, representado por η na figura 4.23, de 8.731,9831 dias, correspondendo a 23,9 anos. Esta vida característica indica que 63,2% destes poços podem falhar neste período e que 36,8% dos poços podem injetar água por mais de 23,9 anos sem quaisquer falhas. Estes resultados também são suportados pela análise prévia dos dados;
- 3- Vida média (*mean life*) dos poços injetores de 10.464 dias, correspondendo a 28,6 anos, ou 28 anos e 7 meses, aproximadamente;
- 4- Os dados disponíveis não permitem uma análise mais apurada em relação aos motivos geradores das intervenções: ao segregarmos os dados os mesmos não suportam uma análise mais detalhada por causas de falhas, já que o número de casos individuais é pequeno;
- 5- A maioria das intervenções foi executada para realizar a limpeza ou remoção de areia do fundo dos poços. Deve-se ressaltar que estes poços, especificamente, não são equipados com métodos de contenção de areia, como tubos telados e areia de granulometria uniforme, mas sim com a BRV (Back Retainer Valve - válvula de injeção). Os projetos destes poços foram aperfeiçoados em 1999, substituindo a BRV pelo sistema de contenção de areia. Desta forma, baseado nos dados e na alteração de projeto, espera-se que a taxa de falha em poços

injetores venha a sofrer uma queda acentuada ao longo dos próximos anos. Talvez isto justifique, de certa forma, a elevada vida característica da população;

6- A população de poços injetores é muito nova. A maior parte destes poços não sofreu quaisquer tipos de falhas. Como estes dados foram censurados, não é recomendável, no momento, proceder à análise por modo de competição entre falhas (*competing failure modes*) para evitarmos distorções nas conclusões.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo principal propor uma metodologia para a aquisição de estimativas fundamentais ao planejamento da manutenção em poços petrolíferos. Neste aspecto, foram identificadas as causas de intervenção em poços, modeladas as falhas e analisado o tempo de vida, com potencial para prever o comportamento dos poços nos anos seguintes, levando-se em consideração a teoria da confiabilidade de sistemas.

O ajuste de distribuição de Weibull aos dados de realização de intervenções com sonda no período em estudo, entre março de 1991 e setembro de 2003, que foi realizado considerando a classificação do motivo real da intervenção, mostrou-se adequado à análise, confirmando o que era recomendado em estudos mais recentes.

Os resultados da análise dos dados coletados dos poços do campo em estudo indicam uma vida média de 8,46 anos para os poços produtores de óleo e de 28,6 anos para os poços injetores de água. Ambos os tipos de poços apresentam

taxas de falha decrescentes em relação ao tempo. Como esta análise é dinâmica, estes valores estão sujeitos a alterações periódicas.

Após a modelagem das falhas, estes ajustes indicaram que a maioria das causas de falha apresentou taxas de falha decrescentes com o tempo, enquanto que outros apresentaram taxas de falha crescentes. Isto é muito importante na medida em que possibilita o direcionamento dos esforços para minimizar a ocorrência dos modos de falha que tendem a crescer ao longo do tempo, além de fornecer uma visão geral do comportamento dos poços nos próximos anos.

A metodologia aqui apresentada forneceu, ao mesmo tempo, o histórico e o cenário provável das futuras intervenções em poços do campo a médio prazo. Entretanto, há outros métodos estatísticos ou não-convencionais disponíveis para auxiliar o planejamento das intervenções.

Um dos fatores mais importantes para quaisquer trabalhos na área de confiabilidade e modelagem de falhas é a existência de bancos de dados consistentes e confiáveis, independentemente do *software* ou ferramenta utilizada. Além disto devemos sempre aliar os conhecimentos estatísticos aos de engenharia de poços.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados, no entanto, durante a pesquisa, verificou-se que existem outros aspectos ainda a serem analisados mediante futura extensão.

Em resumo, esta pesquisa revelou que:

1. Não há trabalho semelhante tanto em relação às falhas em poços em águas profundas como também a modelagem do sistema poço;
2. A curva de aprendizado refletiu a implantação de novas tecnologias;
3. O maior causador de falhas em poços é o hidrato e não a DHSV (Down Hole Safety Valve – Válvula de Segurança de Sub-superfície);
4. O ajuste de distribuição de Weibull é adequado às falhas em poços produtores de óleo e injetores de água;

5. Taxas de falha decrescentes para poços produtores de óleo e injetores de água devem substituir a premissa de taxas de falha constantes até então adotada;
6. Causas de falhas com taxas de falha crescentes merecem maior atenção;
7. Os poços injetores de água falham menos que os poços produtores de óleo;
8. As estimativas das probabilidades de falhas para poços produtores de óleo e injetores de água fornecem o cenário das futuras intervenções;
9. A vida característica dos poços continua em ascensão;
10. O planejamento das intervenções é relevante em função do impacto na rentabilidade do projeto.

Finalmente, vale destacar que em um ambiente de poços em águas profundas, não existe a disponibilidade de um banco de dados da magnitude tratada neste trabalho. Neste aspecto reside a contribuição deste estudo para a indústria do petróleo.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Como primeira recomendação para fazer análises cada vez mais precisas, especificamente para a análise de confiabilidade por modos de falha ou modos de falhas que competem entre si, será necessário estabelecer formas de coleta de dados mais rigorosas. Para isto é necessário estabelecer procedimentos. Contudo, ao se lidar com dados reais de campo, geralmente, é mais difícil coletá-los de maneira completa e consistente, considerando a limpeza e homogeneidade dos dados. Nesta situação, é melhor dispor de poucos dados confiáveis que uma grande massa de dados questionáveis.

Deve-se ressaltar que o sucesso deste trabalho estava diretamente relacionado ao equilíbrio entre conhecimentos das técnicas estatísticas e de confiabilidade com a experiência em engenharia de poços. Isto é importante para a determinação das causas reais das falhas.

Em resumo, como recomendações para futuras pesquisas podem-se citar:

1. Ampliação do modelo do sistema poço em sub-sistemas para estudo de confiabilidade de seus componentes, em série ou em paralelo;
2. Avaliação da confiabilidade e análise de risco em projetos de poços com completação convencional e com completação inteligente;
3. Utilização de modelos de distribuição de vida mais elaborados ou adaptados para melhor representar o sistema na fase de falhas prematuras ou de desgaste;
4. Avaliação do impacto da engenharia de confiabilidade no aperfeiçoamento dos projetos de poços petrolíferos: estudo comparativo entre projetos de poços em função das falhas;
5. Dimensionamento da frota de sondas baseado na previsibilidade das falhas em poços petrolíferos: intervenções probabilísticas e determinísticas;
6. Utilização desta metodologia para reduzir a subjetividade em estudos de viabilidade técnica e econômica em novos projetos de desenvolvimento da produção: estudo de impacto da manutenção em poços em novos projetos;
7. Aplicação desta metodologia a campos petrolíferos maduros ou marginais, tanto marítimos como terrestres, para a determinação dos principais causadores de falhas. Com isto, gera-se a possibilidade da extensão da vida útil dos poços, aumentando a rentabilidade do projeto.

APÊNDICE

APÊNDICE

Existem na literatura várias outras distribuições de probabilidades, além daquelas utilizadas neste trabalho, que podem ser ajustadas aos modelos de tempo de vida de componentes ou sistemas. Também, neste caso, a estimativa é determinada através de um modelo paramétrico.

Estes modelos de distribuições, que descrevem o comportamento de uma população ou de sistemas com suas probabilidades de falhas, são descritos a seguir, além de tópicos complementares como os modelos de regressão a partir de distribuição de falha e a distinção entre modelos.

1. MODELOS DE TEMPO DE VIDA: DISTRIBUIÇÕES

1.1. Distribuição Gama

A distribuição gama, assim como a exponencial, pode ser gerada a partir da distribuição de Poisson. Neste aspecto, ela seria o tempo até a k -ésima chegada de um processo de Poisson. A sua função densidade de probabilidade é dada pela expressão:

$$f(t) = \frac{\lambda^k t^{k-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(k)} \quad t > 0 \quad (\text{A.1})$$

onde $\lambda > 0$ é o fator de escala e $k > 0$ é o fator de forma. O termo $\Gamma(k)$ é a própria função gama que é definida pela seguinte expressão:

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} e^{-s} s^{t-1} ds \quad (\text{A.2})$$

A prática demonstra que esta distribuição não teve o uso tão difundido como a distribuição de Weibull, talvez devido ao fato desta ser mais fácil de se trabalhar. A distribuição gama pode assumir uma grande variedade de formas podendo se amoldar a diversos tipos de dados de falha. Além disto, a distribuição gama tem a exponencial como um caso especial, quando $k = 1$. Logicamente, se $k > 1$ a taxa de falha é crescente e para $0 < k < 1$, ela é decrescente.

1.2. Distribuição Gama Generalizada

Stacy (1962) propôs esta distribuição que, na verdade, engloba todas as outras citadas anteriormente. Ela apresenta uma distribuição com três parâmetros com função densidade de probabilidade dada por:

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta k-1}}{\Gamma(k) \alpha^{\beta k}} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right], \quad t > 0 \quad (\text{A.3})$$

onde $\beta > 0$, $\alpha > 0$ e $k > 0$. Quando $\beta = k = 1$, esta se transforma na distribuição exponencial, caso $k = 1$, na distribuição de Weibull, caso $\beta = 1$, na gama, e no caso limite quando $k \rightarrow \infty$, ela se reduz à distribuição lognormal, Lawless (1982).

Desta forma, esta distribuição apresenta dificuldades para a obtenção de seus parâmetros. A fim de contornar este problema, Prentice (1974) reparametrizou esta distribuição tornando-a mais consistente. Isto foi realizado considerando T possuindo uma função densidade de probabilidade igual à definida na equação

(A.3). A partir desta equação, considerando $Y = \log T$, $\mu = \log \alpha$ e $b = \beta^{-1}$ temos que:

$$W_1 = \frac{Y - \mu}{b} \quad (\text{A.4})$$

Esta última expressão segue uma distribuição log-gama com função densidade de probabilidade dada por:

$$\frac{1}{\Gamma(k)} \exp(kw_1 - e^{w_1}) \quad -\infty < w_1 < \infty \quad (\text{A.5})$$

Segundo Lawless (1982), a distribuição de $\sqrt{k}(w_1 - \log k)$ converge para uma normal padrão quando $k \rightarrow \infty$. Nesta situação, será necessária uma nova parametrização dada por:

$$W = \sqrt{k}(w_1 - \log k) = \frac{Y - (u + b \log k)}{b/\sqrt{k}} = \frac{Y - \mu}{\sigma} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{sendo } \sigma = \frac{b}{\sqrt{k}} \text{ e } \mu = u + b \log k \quad (\text{A.7})$$

Logo, a função densidade de probabilidade de W pode ser formulada a partir da equação (A.6) para dois casos, primeiro para k finito e maior que zero. Desta forma, temos:

$$f(w; k) = \frac{k^{k-1/2}}{\Gamma(k)} \exp\left(\sqrt{k}w - ke^{w/\sqrt{k}}\right) \quad -\infty < w < \infty \quad (\text{A.8})$$

De forma análoga, a função densidade de probabilidade de $Y = \log T$ será dada por:

$$f_Y(y) = \frac{k^{k-1/2}}{\sigma \Gamma(k)} \exp\left(\sqrt{k} \frac{y - \mu}{\sigma} - ke^{(y-\mu)/\sigma\sqrt{k}}\right) \quad -\infty < y < \infty \quad (\text{A.9})$$

A equação (A.8) se aproxima da normal padrão quando $k \rightarrow \infty$, resultando a seguinte expressão:

$$f(w; \infty) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-w^2/2} \quad -\infty < w < \infty. \quad (\text{A.10})$$

Segundo Accioly (1995), a distribuição gama generalizada, devido às suas características, é muito aplicada para realizar a discriminação entre os diversos modelos de distribuições.

1.3. Distribuição F Generalizada

De acordo com Kalbfleisch e Prentice (1980), esta distribuição tem como principal característica a possibilidade de considerar todas as distribuições anteriores como casos especiais, Além disto, ela pode se transformar em uma distribuição log-logística, que é um modelo ainda utilizado para a realização de testes de sobrevivência (Accioly, 1995).

Segundo Hines e Montgomery (1990), como esta distribuição emprega o logaritmo dos tempos de vida, ela é conhecida na literatura como um modelo de locação e escala para $\log T$, na qual é adotada a hipótese de que a distribuição do erro é a do logaritmo de uma variável que tem distribuição F com $2m_1$ e $2m_2$ graus de liberdade. Esta tem a forma $Y = \mu + \sigma W$ onde a função densidade de probabilidade de W é dada pela seguinte expressão:

$$f(w; m_1, m_2) = \frac{(m_1/m_2)^{m_1} \exp(wm_1) [1 + m_1 e^w / m_2]^{-(m_1+m_2)}}{B(m_1, m_2)}$$

(A.11)

O denominador é a função beta dada por:

$$B(m_1, m_2) = \Gamma(m_1)\Gamma(m_2)/\Gamma(m_1 + m_2) \quad (\text{A.12})$$

Para exemplificar, a distribuição de Weibull é obtida considerando $(m_1, m_2) = (1, 1)$. Adicionalmente, caso $\sigma = 1$, teremos a distribuição exponencial. Da mesma forma, a distribuição gama generalizada será obtida considerando $m_2 \rightarrow \infty$ e a distribuição gama se adotarmos, adicionalmente, $\sigma = 1$. Finalmente, a distribuição lognormal é conseguida assumindo que $(m_1, m_2) \rightarrow \infty$.

2. MODELOS DE REGRESSÃO A PARTIR DE DISTRIBUIÇÕES DE FALHA

As distribuições apresentadas anteriormente, nas formas expostas, não admitem a presença de variáveis que influenciam os tempos de vida. Para resolver esta questão, será necessária uma generalização de forma que estas permitam a inclusão de variáveis concomitantes.

Segundo Lawless (1982), esta generalização pode ser obtida utilizando o conceito de regressão múltipla, em que temos as variáveis dependentes, que neste caso é o tempo de vida, e as variáveis explanatórias, chamadas de covariáveis, que podem ser quantitativas ou qualitativas.

2.1. Modelos de Regressão Aplicados a Modelos de Tempo de Vida

Como o modelo de Weibull foi largamente utilizado neste trabalho, vamos aplicá-lo com os dois parâmetros descritos anteriormente para facilitar a compreensão.

A expansão deste modelo, objetivando acrescentar as covariáveis, pode ser obtida considerando os parâmetros, da distribuição de Weibull, η (fator de escala) e β (fator de forma) dependentes destas covariáveis. Vamos admitir a aplicação mais comum na prática, que é a dependência somente em relação ao parâmetro η .

Neste caso, o parâmetro β será considerado uma constante. Supondo X como um vetor de $1 \times p$ variáveis de regressão, a função de sobrevivência para esta distribuição adquire a seguinte forma (Accioly, 1995):

$$S(t | \mathbf{X}) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta(\mathbf{X})}\right)^\beta\right] \quad t \geq 0 \quad (\text{A.13})$$

onde $\eta(\mathbf{X})$ é uma função de X que engloba parâmetros desconhecidos.

A distribuição de Weibull apresenta uma característica importante neste cenário: o conceito de modelos de taxas proporcionais. Considerando a taxa de falha já adaptada ao modelo de regressão, tem-se a seguinte expressão:

$$h(x) = \frac{-S'(t | \mathbf{X})}{S(t | \mathbf{X})} = \frac{\beta}{\eta(\mathbf{X})} \left(\frac{t}{\eta(\mathbf{X})}\right)^{\beta-1} \quad (\text{A.14})$$

Caso seja necessário analisar o tempo de vida de um determinado componente de um sistema, podemos utilizar a razão entre as taxas de falha de dois componentes. Nesta situação, podemos observar que o termo t , tempo, desaparecerá, restando apenas o fator de escala $\eta(\mathbf{X})$ e o fator de forma β .

$$\left(\frac{h(t | \mathbf{X}_1)}{h(t | \mathbf{X}_2)}\right) = \left(\frac{\eta(\mathbf{X}_2)}{\eta(\mathbf{X}_1)}\right)^\beta \quad (\text{A.15})$$

A relação anterior introduz o conceito da proporcionalidade da taxa de falha. Os modelos que apresentam esta característica pertencem a um grupo designado de modelos de taxas proporcionais.

A equação (A.13) pode ser reescrita na forma de uma distribuição de $Y = \log T$, dado o vetor X . A densidade de probabilidade de Y , dado X , é dada pela seguinte expressão:

$$f(y|X) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[\frac{y - \mu(X)}{\sigma} - \exp\left(\frac{y - \mu(X)}{\sigma}\right)\right] \quad -\infty < y < \infty \quad (\text{A.16})$$

onde $\sigma = 1/\beta$ e $\mu(X) = \log \eta(X)$. Reescrevendo a equação tem-se que:

$$Y = \mu(X) + \sigma Z \quad (\text{A.17})$$

onde Z tem uma distribuição padrão de valor extremo com densidade de probabilidade $\exp(z - e^z)$, $-\infty < z < \infty$. Este modelo é designado por modelo de regressão locação-escala com erro Z .

Por outro lado, adotando-se para o valor de $\mu(X)$ o formato do gênero:

$$\mu(X) = X\delta \quad (\text{A.18})$$

onde $X = (x_1, \dots, x_p)$ é um vetor $1 \times p$ de variáveis de regressão e $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_p)$

um vetor $1 \times p$ de coeficientes de regressão, teremos a cl02D7(1 x)JTJETq289.86 436.2298

Os modelos de taxas proporcionais são aqueles em que indivíduos diferentes têm suas taxas de falha proporcionais entre si, onde o fator tempo t é cancelado. Isto significa que a razão entre duas taxas de falha para dois indivíduos não varia com o tempo. Logo, a função taxa de falha de T , dado X , pode ser definida da seguinte maneira:

$$h(t | X) = h_0(t) g(X)$$

(A.19)

onde os termos h_0 e g podem incluir parâmetros incógnitos. Desta forma, pode-se considerar $h_0(t)$ como a taxa de falha básica para um indivíduo que tem $g(X) = 1$.

Cox (1972), que foi o primeiro a estudar este tipo de função, apresentou a forma mais conhecida da função $g(X)$, dentre todas as outras. Ela é expressa da seguinte forma:

$$h(t | X) = h_0(t) e^{X\delta}$$

(A.20)

Pode-se concluir que neste modelo as covariáveis atuam de forma multiplicativa em relação à taxa de falha.

Além disto, a função taxa de falha $h_0(t)$ é considerada desconhecida, isto é, a princípio não é pré-definida uma distribuição, como por exemplo a de Weibull ou outra qualquer, para os dados de tempo de vida. Nesta forma não paramétrica, o modelo se torna mais flexível, necessitando uma abordagem diferenciada para estimar os parâmetros desconhecidos (Accioly, 1995). Cox (1972, 1975) utilizou a verossimilhança parcial e Kalbfleisch e Prentice (1973) a verossimilhança marginal para resolver a questão. Segundo Kalbfleisch e Prentice (1980), as duas propostas fornecem basicamente os mesmos resultados, mas indicam a necessidade de modificações no caso de os dados apresentarem um grande número de tempos de

vida semelhantes. Mas, conforme Kay (1977), a versão paramétrica deste modelo não é alterada devido à existência de tempos similares.

Baseada na equação (A.20), a função densidade condicional de T dado X é dada por:

$$f(t; X) = h_0(t) e^{X\delta} \exp \left[-e^{X\delta} \int_0^t h_0(\mu) d\mu \right] \quad (\text{A.21})$$

Adicionalmente, a função de sobrevivência condicional de T dado X é dada por:

$$S(t; X) = [S_0(t)]^{\exp(X\delta)} \quad (\text{A.22})$$

2.3. Modelos Log-Lineares para T

Este modelo difere do anterior no sentido de que as covariáveis agem de forma multiplicativa em relação a T , e não em relação à taxa de falha para T .

Pertencente à classe para o qual o logaritmo do tempo de vida $Y = \log T$, dado X , este modelo apresenta uma distribuição com parâmetro de localização $\mu(X)$ e uma constante de escala σ , da seguinte forma:

$$Y = \mu(X) + \sigma Z \quad (\text{A.23})$$

sendo Z uma variável erro possuindo uma distribuição independente de X . A função de sobrevivência de Y , dado X , possui a forma $G\{[y - \mu(X)]/\sigma\}$, onde $G(Z)$ é a função de sobrevivência para z .

A função de sobrevivência para $T = \exp Y$ é dada pela seguinte expressão:

$$S(t | X) = G\left(\frac{\log t - \mu(X)}{\sigma}\right) = S_1\left[\left(\frac{t}{\eta(X)}\right)^\beta\right] \quad (\text{A.24})$$

onde $\eta(\mathbf{X}) = \exp[\mu(\mathbf{X})]$, $\beta = 1/\sigma$ e $S_1(w) = G(\log w)$. Estes resultados podem ser reescritos da seguinte forma, segundo Accioly (1995):

$$S(t | \mathbf{X}) = S_0\left(\frac{t}{\eta(\mathbf{X})}\right) \quad (\text{A.25})$$

onde $S_0(w) = S_1(w^\beta)$.

Logicamente, a taxa de falha de T , dado \mathbf{X} , é dada pela expressão:

$$h(t | \mathbf{X}) = \eta(\mathbf{X})^{-1} h_0\left[\frac{t}{\eta(\mathbf{X})}\right]$$

(A.26)

onde $h_0(t)$ é a taxa de falha para um indivíduo com $\eta(\mathbf{X}) = 1$.

A função taxa de falhas pode ser expressa de outra forma, substituindo $\eta(\mathbf{X})$ por $\exp[\mu(\mathbf{X})]$:

$$h(t) = h_0\left(te^{-X\delta}\right)e^{-X\delta} \quad (\text{A.27})$$

Confrontando esta expressão com a equação (A.20), torna-se evidente que no modelo locação-escala, ou modelo de envelhecimento acelerado, as covariáveis atuam de forma multiplicativa em T , ao passo que no modelo de taxas proporcionais elas atuam de forma multiplicativa na função taxa de falhas para T .

3. DISTINÇÃO ENTRE MODELOS

Os estudos quanto à diferenciação entre os diversos modelos existentes na literatura tornaram-se importantes à medida que surgiram novas distribuições apropriadas aos tempos de vida de componentes e sistemas.

Especificamente, quanto aos estudos referentes aos modelos paramétricos, o grande avanço foi proporcionado por Stacy (1962) ao propor o modelo gama

generalizado, englobando diversas distribuições como casos especiais. Mas, várias incompatibilidades numéricas ocorriam durante as tentativas de se ajustar o modelo.

Pereira (1977) apresentou uma extensa bibliografia referente à discriminação entre os diversos modelos existentes na literatura. Posteriormente, Pereira (1981) divulgou uma bibliografia adicional referente ao mesmo estudo.

Prentice (1974) reparametrizou o modelo proposto por Stacy (1962) aplicando o método de Newton-Raphson. Esta abordagem, além de tornar o modelo mais robusto e estável, facilitou a inclusão das distribuições exponencial, Weibull, gama e a lognormal.

Novamente, Prentice (1975) propôs um modelo ainda mais abrangente, chamado de F generalizado, que passou a englobar todas as distribuições supracitadas além da gama generalizada, considerando ainda as distribuições χ^2 , t e F como casos especiais. A grande desvantagem deste modelo reside na exigência de rotinas de otimização potentes que tornam a sua aplicabilidade mais complexa.

Na prática, a distinção entre os modelos paramétricos é realizada mediante a aplicação dos chamados testes de hipóteses, amplamente utilizados em técnicas estatísticas.

O modelo de Cox (1972, 1975), que não é paramétrico, necessita de outros tipos de generalizações já que os modelos supracitados são totalmente paramétricos. Ciampi e Etazadi-Amoli (1985, 1987) propuseram uma alternativa para realizar as comparações entre modelos ao juntar os modelos de envelhecimento acelerado e de taxas proporcionais em um modelo híbrido da seguinte forma:

$$h(t; z) = g_1(\eta \cdot z) h_0(g_2(\delta \cdot z) t) \quad (\text{A.28})$$

onde $g_1(x)$ e $g_2(x)$ são funções com valores positivos possuindo o valor igual a unidade quando t é igual a zero. Neste caso, $h_0(t)$ corresponde à taxa de falha básica. Logicamente, os casos especiais, taxas proporcionais e envelhecimento

acelerado, são conseguidos para as ocasiões em que $\delta = 0$ e $\eta = \delta$, respectivamente. Um outro atributo do modelo proposto pelos últimos autores é a aproximação da função taxa de falhas básica, $h_0(t)$, mediante uma equação polinomial quadrática. Vale ressaltar que a distinção entre os modelos, igualmente, é realizada a partir de testes de hipóteses, o que foge ao escopo deste trabalho.

Na prática, conforme demonstrada anteriormente, a distinção entre os modelos paramétricos e sua escolha adequada é realizada mediante utilização de *software* específico, o que foi empregado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accioly, R.M.S. (1995). *Análise da Duração do Tempo de Vida de Bombas Centrífugas Submersas*. Dissertação de Mestrado – UFRJ.
- Accioly, R.M.S., Martins, J.A. (1992). O Planejamento da Completação de Poços e Workover, *Conexpo ARPEL*.
- Accioly, R.M.S., Martins, J.A. (1999). Análise do Comportamento dos Poços de Petróleo Segundo a Duração das Intervenções com Sonda e do Tempo entre as Intervenções. *PETROBRAS*.
- Accioly, R.M.S., Martins, J.A. (1999). Análise do Tempo entre as Intervenções e Duração das Intervenções com Sonda. *PETROBRAS*.
- Accioly, R.M.S., Martins, J.A. (2001). O Planejamento da Manutenção em Poços. *IV SEP – IV Seminário de Engenharia de Petróleo -PETROBRAS*.
- Accioly, R.M.S., Martins, J.A., CHIYOSHI, F.Y. (1998). A Utilização da Simulação de Monte Carlo na Determinação do Número Ótimo de Sondas, *IBP 22298*.
- Bain, L. J. (1978). *Statistical Analysis of Reliability and Life-Testing Models: Theory and Models*. Marcel Dekker, New York.
- Ciampi, A. e Etezadi-Amoli, J. (1985). *A General Model for Testing The Proportional Hazards and The Accelerated Failure Time Hypothesis in The*

- Analysis of Censored Survival Data With Covariates. Commun. Stat. – Theor. Math.*
- Cox, D. R. (1972). *Regression Models and Life Tables (with discussion)*, J.R. Stat. Soc. A.
- Cox, D. R. e Oakes, D. (1984). *Analysis of Survival Data*. Chapman & Hall, London.
- Cox, D.R. (1975). *Partial Likelihood*. Biometrika.
- Cox, D.R. e Hinkley, D. V. (1974). *Theoretical Statistics*. Chapman & Hall, London.
- Crowder, M.J., Kimber, A.C., Smith, R. L., Sweeting, T. J. (1991). *Statistical Analysis of Reliability Data*. Chapman & Hall, London.
- D´ Almeida, A.L., (2000). Determinação de Frota de Sondas de Petróleo Aplicando a Teoria das Opções Reais. *IBP 26100*.
- Derman, C. e Klein, M. (1959). *Probability and Statistical Inference for Engineers*. New York, Oxford University Press.
- Efron, B. (1967). *Two Sample Problem With Censored Data*. Proc. Fifth Berkeley Symp.
- Garcia, José E. L. ; (1997). *A Completação de Poços no Mar*. Apostila. PETROBRAS.
- Gumbel, E. J. (1935). *Les Valeurs Extremes des Distributions Statistiques*. Annales de l'Institut Henri Poincaré.
- Hedrick, J., Philips, S., Crivello, T., Sakocius, K. (2003). Well Optimization Extends Reservoir Life. *Hart's E&P*, 76, 5: 65-67.
- Hines, W.W. e Montgomery, D.C. (1990). *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*. 3 ed. Wiley, New York.
- Jorge, N. M. (2000). *Reliability Assessment and Risk Analysis of Submarine Blowout Preventers*. PhD thesis, Heriot-Watt University, U.K.
- Kalbfleisch, J.D. e Prentice, R. L. (1973). *Marginal Likelihoods Base don Cox's Regression and Life Model*. Biometrika.
- Kalbfleisch, J.D. e Prentice, R. L. (1980). *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. Wiley, New York.
- Kaplan, E. L. e Meier, P. (1958). *Nonparametric Estimation From Incomplete Observations*. J. Am. Stat. Assoc.

- Kay, R. (1977). *Proportional Hazard Regression Models and the Analysis of Censored Survival Data*. Applied Statistics.
- Lafraia, J. R.B. (2001). *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro. Qualitymark: PETROBRAS.
- Lawless, J. F. (1982). *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. Wiley, New York.
- Lawless, J. F., (1983). *Statistical Methods in Reliability*. Technometrics.
- Lee, E. T. (1980). *Statistical Methods for Survival Data Analysis*. Lifetime Learning, Belmont.
- Lindqvist, B., Molnes, E., Rausand, M. (1988). *Analysis of SCSSV Performance Data*. Reliability Engineering and System Safety.
- Mann, N.R., Schafer, R. E., Singpurwalla, N. D. (1974). *Methods For Statistical Analysis of Reliability and Life Data*. Wiley, New York.
- Martins, J.A., Accioly, R.M.S. (2000). Análise Estatística das Falhas dos Poços de Marlim. VI ETEC.
- Meyer, Paul L. (1984). *Probabilidade – Aplicações à Estatística*. Editora LTC – Rio de Janeiro.
- Miura, Kazuo et al (1999). Data Warehouse: Consolidação, Flexibilidade, Facilidade e Confiabilidade nos Dados Para Tomada de Decisão III SEP - III Seminário de Engenharia de Petróleo- PETROBRAS, Rio de Janeiro.
- Nelson, Wayne (1982). Applied Life Data Analysis. Wiley, New York.
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods; <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr181.htm> em 21/11/2003.
- Patterson, M. M., (1991). A Model for Estimating the Life of Electrical Submersible Pumps. *SPE 66 th Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 22790, Dallas, Texas, U.S.A.
- Patterson, W. E. (1973). An Economic Evaluation Technique for Workovers with Declining Production. SPE 4618.
- Perdue, J.M., (2001). Oilfields Go Completely Digital. *Emerging Tecnology - Hart's E &P*, Dezembro 2001.
- Pereira, B de B. (1977). *Discriminating Among Separate Models: a Bibliography*. Int. Stat. Rev.

