

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

WILLIAM HIROSHI KUVABARA PEREIRA

**MODELAMENTO DO SISTEMA LOGÍSTICO DE PETRÓLEO DO
LITORAL PAULISTA: FOCO EM CONFIABILIDADE E
DISPONIBILIDADE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

SÃO PAULO

2016

WILLIAM HIROSHI KUVABARA PEREIRA

**MODELAMENTO DO SISTEMA LOGÍSTICO DE PETRÓLEO DO
LITORAL PAULISTA: FOCO EM CONFIABILIDADE E
DISPONIBILIDADE**

Monografia de conclusão de curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, da Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

SÃO PAULO

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

MODELAMENTO DO SISTEMA LOGÍSTICO DE PETRÓLEO DO LITORAL PAULISTA: FOCO EM CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

por

WILLIAM HIROSHI KUVABARA PEREIRA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado quinze de dezembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano
Prof. Orientador

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
UTFPR

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha esposa,
Viviane, pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte desta importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a Transpetro e aos gestores Carlos Renato Aragonez de Vasconcellos, Carlos Roberto Bortolon, Virmar Guimarães Muzitano e Guilherme Augusto Machado Simão pela confiança, incentivo e por proporcionar a oportunidade de me especializar com a Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Rodrigues, pela sabedoria, disponibilidade e atenção com que me auxiliou e guiou nesta trajetória.

Aos professores da UTFPR e consultores da *Reliasoft*, por proporcionar a troca de experiências e contribuir na minha formação em confiabilidade.

Aos colegas de empresa, principalmente Eder Sales e Rubens Prado, pelo auxílio na obtenção dos dados de falhas dos equipamentos.

À minha esposa Viviane, por todo amor, carinho e compreensão nos momentos de ausência os quais dediquei ao trabalho.

Aos amigos de Pós-graduação, pela amizade e pelos momentos de descontração, além da troca de experiências.

Por fim, à Deus, por proporcionar a família e amigos.

“ Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados. ”

(MAHATMA GANDHI)

RESUMO

Pereira, William H. K. **Modelamento do sistema logístico de petróleo do litoral paulista: foco em confiabilidade e disponibilidade.** 2016. 101 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, São Paulo, 2016.

O sistema logístico de petróleo do litoral paulista, composto de terminais e dutos, tem importância estratégica na produção de combustíveis como gasolina, óleo diesel, GLP, querosene de aviação, além de nafta, aguarrás, propeno e solventes especiais, etc. As refinarias geralmente trabalham com baixos estoques de petróleo, assim, uma indisponibilidade acentuada do sistema logístico pode causar desabastecimento desses centros produtores de derivados e, conseqüentemente afetar consumidores como empresas dos setores de transporte rodoviário, aviação e naval. Neste contexto, o trabalho tem por objetivo modelar esse sistema para seus cenários operacionais usuais e simular seu comportamento dinâmico de operação e, o processo falha/ reparo ao longo de 1 ano. Após a simulação, obteve-se parâmetros de interesse para os blocos como tempos disponível e indisponível, número de falhas esperadas, tempo médio entre falhas (MTBF) e disponibilidade. Por fim, identifica-se os sistemas que mais contribuem nos aspectos de interesse como indisponibilidade ou falhas com paradas dos sistemas e, com isso, pode-se aprimorar as estratégias de gestão dos ativos.

Palavras-chave: Logística. Petróleo. Disponibilidade. Confiabilidade. Manutenção.

ABSTRACT

Pereira, William H. K. **Modeling of the petroleum logistics system on the São Paulo coast: focus on reliability and availability.** 2016. 101 p. Monograph (Specialization in Reliability Engineering) - Office of Research and Graduate Studies of the Federal University of Technology of Paraná. São Paulo, 2016.

The petroleum logistics system on the São Paulo coast, composed of terminals and pipelines, has strategic importance in the production of fuels such as gasoline, diesel oil, LPG, jet fuel, as well as naphtha, turpentine, propene and special solvents, etc. Refineries generally work with low oil stocks, so a sharp logistics system unavailability may cause shortages of these derivatives producer centers and consequently affect consumers as companies from the sectors of road transport, aviation and naval. In this context, the objective of the work is to model this system for its usual operating scenarios and to simulate its dynamic behavior of operation, and the failure/repair process over a year. After the simulation, parameters of interest for the blocks as available and unavailable times, number of expected failures, mean time between failures (MTBF) and availability are obtained. Finally, it identifies the systems that contribute most to the interest aspects such as unavailability or failures with system stops, and with this, it is possible to improve strategies of asset management.

Keywords: Logistics. Petroleum. Availability. Reliability. Maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma com as etapas do estudo	17
Figura 2 - Diagrama simplificado do sistema de abastecimento de Petróleo de SP .	20
Figura 3 - Sistema de Petróleo do Litoral Paulista.....	21
Figura 4 - Tela de parte dos tanques de petróleo.	24
Figura 5 - Sistema de Mistura, Bombas Auxiliares e Bombas Principais do OSBAT	25
Figura 6 – Fluxograma Operacional da Estação de Guaratuba	25
Figura 7 - Fluxograma do sistema de petróleo na refinaria RPBC.....	28
Figura 8 – Tanques de armazenamento do terminal de Cubatão	29
Figura 9 – Representação das bombas do terminal de Cubatão	30
Figura 10 - Classificação das falhas.....	37
Figura 11 - Distribuição normal de probabilidade	41
Figura 12 – Efeito de σ na curva <i>pdf</i> da distribuição normal.....	41
Figura 13 – Efeito da variação de μ' na <i>pdf</i> da distribuição lognormal	43
Figura 14 – Efeito de σ' na curva <i>pdf</i> da distribuição lognormal	43
Figura 15 – Efeito da variação de λ na <i>pdf</i> da distribuição exponencial	45
Figura 16 – Efeito da variação de β na <i>pdf</i> da distribuição Weibull	46
Figura 17 – Efeito da variação de β na função R(t) da distribuição Weibull.....	47
Figura 18 – Efeito da variação de β na taxa de falha λ da distribuição Weibull	48
Figura 19 – Efeito da variação de η na curva <i>pdf</i> da distribuição Weibull.....	48
Figura 20 – Efeito da variação de γ na curva <i>pdf</i> da distribuição Weibull	49
Figura 21 – Exemplo de um sistema em série.....	50
Figura 22 – Exemplo de um sistema em paralelo simples.....	51
Figura 23 – Exemplo de um sistema em paralelo combinado	52
Figura 24 – Processo de renovação de um componente durante seu ciclo de vida .	54
Figura 25 – Processo de renovação de um sistema em série	54
Figura 26 – Representação dos equipamentos/subsistemas do sistema de Petróleo	57
Figura 27 – Cenário 1 – Operação de abastecimento de SSE para RPBC	57
Figura 28 – Cenário 2 – Operação de abastecimento de SSE para RECAP.....	57
Figura 29 - Subsistemas Elétrico e Operacional de SSE.....	59
Figura 30 – Subsistema bombas auxiliares BA-3207 A/B/C do OSBAT – SSE	61
Figura 31 – Subsistema bombas principais B-3208 A/B/C/D do OSBAT – SSE.....	63
Figura 32 - Subsistema bombas principais B-3404 A/B – Estação de Guaratuba	66
Figura 33 – Subsistema refinaria RPBC.....	68
Figura 34 – Subsistema Terminal de Cubatão	69

Figura 35 – Subsistema bombas auxiliares BA-05 A/B do terminal de Cubatão.....	71
Figura 36 – Subsistemas - bombas principais BP-02/03/05/12/13 do terminal de Cubatão	73
Figura 37 – Subsistema Refinaria de Capuava - RECAP	76
Figura 38 – Representação dos subsistemas contemplados no cenário 1	78
Figura 39 – Montagem do diagrama de blocos do cenário 1 no <i>Blocksim</i>	79
Figura 40 – Visão Geral do Sistema no cenário 1	80
Figura 41 – Resumo individual dos blocos no cenário 1.....	80
Figura 42 - Representação dos subsistemas contemplados no cenário 2	86
Figura 43 - Montagem do diagrama de blocos do cenário 2 no <i>Blocksim</i>	87
Figura 44 – Visão Geral do Sistema no cenário 2	88
Figura 45 - Resumo individual dos blocos no cenário 2	88

FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Vista aérea do terminal de São Sebastião.	22
Fotografia 2 - Píeres de atracação de navios.....	22
Fotografia 3 - Exemplo de tanque de armazenamento de petróleo	23
Fotografia 4 - Vista da Refinaria Presidente Bernardes.....	26
Fotografia 5 - Terminal de Cubatão.....	29
Fotografia 6 - Vista da refinaria de Capuava	31

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Disponibilidade e Confiabilidade do sistema no cenário 1	81
Gráfico 2 - Estado Disponível/Indisponível para os subsistemas no cenário 1	82
Gráfico 3 - Disponibilidade dos subsistemas no cenário 1	83
Gráfico 4 - Falhas esperadas para os subsistemas no cenário 1	84
Gráfico 5 – Índice de Criticidade de Falha <i>Reliasoft</i> para o cenário 1	84
Gráfico 6 – Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema <i>Reliasoft</i> para o cenário 1	85
Gráfico 7 - Disponibilidade e Confiabilidade do sistema no cenário 2	89
Gráfico 8 - Estado Disponível/Indisponível para os subsistemas no cenário 2	90
Gráfico 9 - Disponibilidade dos subsistemas no cenário 2	91
Gráfico 10 - Falhas esperadas para os subsistemas no cenário 2	92
Gráfico 11 - Índice de Criticidade de Falha <i>Reliasoft</i> para o cenário 2	93
Gráfico 12 - Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema <i>Reliasoft</i> para o cenário 2	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equipamentos operacionais do sistema	55
Tabela 2 - Tempo entre falhas para os subsistemas de São Sebastião	59
Tabela 3 - Tempo de reparo para os subsistemas de São Sebastião	59
Tabela 4 - Modelos de Confiabilidade para os subsistemas de SSE	60
Tabela 5 - Modelos de Manutenibilidade para os subsistemas de SSE	60
Tabela 6 – Tempo entre Falhas para as bombas BA-3207 A/B/C	61
Tabela 7 - Tempo de Reparo para as bombas BA-3207 A/B/C	62
Tabela 8 - Modelos de Confiabilidade para as BA-3207 A/B/C	62
Tabela 9 - Modelos de Manutenibilidade para as BA-3207 A/B/C	62
Tabela 10 - Tempo entre Falhas para as bombas B-3208 A/B/C/D	63
Tabela 11 - Tempo de Reparo para as bombas B-3208 A/B/C/D	64
Tabela 12 - Modelos de Confiabilidade para as bombas B-3208 A/B/C/D	65
Tabela 13 - Modelos de Manutenibilidade para as bombas B-3208 A/B/C/D	65
Tabela 14 - Tempo entre Falhas para as bombas B-3404 A/B	66
Tabela 15 - Tempo de Reparo para as bombas B-3404 A/B	66
Tabela 16 - Modelos de Confiabilidade para as bombas B-3404 A/B	67
Tabela 17 - Modelos de Manutenibilidade para as bombas B-3404 A/B	67
Tabela 18 - Tempo entre Falhas para RPBC	68
Tabela 19 - Tempo de Reparo para RPBC	68
Tabela 20 - Modelos de Confiabilidade para a RPBC	69
Tabela 21 - Modelos de Manutenibilidade para a RPBC	69
Tabela 22 - Tempo entre Falhas para Terminal de Cubatão	70
Tabela 23 - Tempo de Reparo para Terminal de Cubatão	70
Tabela 24 - Modelos de Confiabilidade para a TCUB	70
Tabela 25 - Modelos de Manutenibilidade para a TCUB	70
Tabela 26 - Tempo entre Falhas para bombas auxiliares BA-05 A/B	71
Tabela 27 - Tempo de Reparo para bombas auxiliares BA-05 A/B	71
Tabela 28 – Modelos de Confiabilidade para bombas auxiliares BA-05 A/B	72
Tabela 29 – Modelos de Manutenibilidade para bombas auxiliares BA-05 A/B	72
Tabela 30 – Tempo entre Falhas das bombas principais BP-02/03/05/12/13	73
Tabela 31 - Tempo de Reparo das bombas principais BP-02/03/05/12/13	74
Tabela 32 – Modelos de Confiabilidade das bombas principais BP-02/03/05/12/13	75
Tabela 33 – Modelos de Manutenibilidade das bombas principais BP-02/03/05/12/13	75
Tabela 34 – Tempo entre Falhas para a RECAP	77
Tabela 35 – Tempo de Reparo para a RECAP	77
Tabela 36 - Modelos de Confiabilidade para RECAP	77
Tabela 37 - Modelos de Manutenibilidade para RECAP	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

Med.	Média da distribuição (Normal, Lognormal).
Tmed.	Tempo médio para distribuição exponencial

LISTA DE SIGLAS

BA	Bomba auxiliar
BP ou B	Bomba principal
cdf	<i>Cumulative density function</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DP	Desvio Padrão da distribuição (Normal ou Lognormal)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GRT	Estação de Guaratuba
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
LDA	<i>Life Data Analysis</i>
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
OM	Ordem(s) de Manutenção
pdf	<i>Probability density function</i>
RAM	<i>Reliability, Availability, Maintainability</i>
RBD	<i>Reliability Block Diagrams</i>
RS DTCl	Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema - <i>Reliasoft</i>
RS FCI	Índice de Criticidade de Falha - <i>Reliasoft</i>
S-10, S-50, S-500	Quantidade de enxofre no combustível (em ppm)
SAP	Sistema de Gestão utilizado pela equipe de Manutenção
URFCC	Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido de Resíduo

LISTA DE ACRÔNIMOS

OSBAT	Oleoduto que interliga o terminal de São Sebastião à refinaria RPBC
OSPLAN	Oleoduto que interliga o terminal de Guararema à refinaria REPLAN
OSSP P	Oleoduto que interliga o terminal de Cubatão à refinaria RECAP
OSVAT	Oleoduto que interliga os terminais de São Sebastião e Guararema
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
R4	Oleoduto que interliga a refinaria RPBC ao terminal de Cubatão
RECAP	Refinaria de Capuava
REPLAN	Refinaria de Paulínia, anteriormente denominada Refinaria do Planalto
REVAP	Refinaria Henrique Lage (Vale do Paraíba)
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes
TCUB	Terminal de Cubatão
TEBAR	Terminal Almirante Barroso, antiga denominação do Terminal de São Sebastião
Transpetro	Petrobras Transportes S.A.
TSSE	Terminal de São Sebastião

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	13
1.1.1 Delimitação do Tema	14
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 JUSTIFICATIVA.....	16
1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 O SISTEMA OPERACIONAL	19
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 VISÃO GERAL DA MALHA LOGÍSTICA DE PETRÓLEO DE SÃO PAULO	20
2.3 UNIDADE DE ORIGEM – TERMINAL DE SÃO SEBASTIÃO (TSSE).....	21
2.4 A ESTAÇÃO DE RECALQUE DE GUARATUBA - GRT	25
2.5 A REFINARIA PRESIDENTE BERNARDES - RPBC.....	26
2.6 TERMINAL TRANSPETRO DE CUBATÃO - TCUB.....	28
2.7 REFINARIA DE CAPUAVA - RECAP	30
3 CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE	32
3.1 CONTEXTO DA CONFIABILIDADE	32
3.2 CONCEITOS DE FUNÇÕES	34
3.2.1 Definição de Funções	34
3.2.2 Funções Primárias.....	34
3.2.3 Funções Secundárias	35
3.2.4 Funções de Proteção.....	35
3.3 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE	35
3.4 CONCEITOS DE FALHA	36
3.5 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA.....	38
3.6 PRINCIPAIS DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS.....	39
3.6.1 Distribuição Normal	40
3.6.2 Distribuição Lognormal	42
3.6.3 Distribuição Exponencial.....	44
3.6.4 Distribuição Weibull	45
3.7 DIAGRAMAS DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE	50
3.8 DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE	53
4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DO SISTEMA	55
4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE VIDA DOS SUBSISTEMAS.....	55
4.2 SUBDIVISÃO DAS OPERAÇÕES DO SISTEMA	56

4.3	MODELOS DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE DOS SUBSISTEMAS	58
4.3.1	Terminal de São Sebastião – TSSE	58
4.3.2	Bombas Auxiliares – BA-3207 A/B/C – São Sebastião	61
4.3.3	Bombas principais – B-3208 A/B/C/D – São Sebastião	63
4.3.4	Estação de Guaratuba - Bombas principais B-3404 A/B.....	65
4.3.5	Refinaria Presidente Bernardes – Falhas Elétricas ou Operacionais	67
4.3.6	Terminal de Cubatão – Falhas Elétricas ou Operacionais.....	69
4.3.7	Bombas auxiliares BA-05 A/B – Terminal de Cubatão	71
4.3.8	Bombas alternativas principais – BP 02/03/05/12/13 - Terminal de Cubatão .	72
4.3.9	Refinaria de Capuava - RECAP	76
5	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	78
5.1	CENÁRIO 1 – SÃO SEBASTIÃO ABASTECE RPBC	78
5.1.1	Resultados do Cenário 1	80
5.1.2	Interpretação dos resultados do cenário 1	85
5.2	CENÁRIO 2 – SÃO SEBASTIÃO ABASTECE RECAP	86
5.2.1	Resultados do Cenário 2	87
5.2.2	Interpretação dos resultados do cenário 2	93
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
7	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tratará do tema desenvolvido no estudo, suas delimitações, detalhamento do problema e as premissas adotadas, objetivos e justificativas.

1.1 TEMA

Um duto terrestre pode ser definido como a ligação de tubos destinados ao transporte de petróleo, seus derivados ou gás natural. São classificados em oleodutos, quando transportam líquidos, ou seja, petróleo e seus derivados e em gasodutos quando transportam gases. Os oleodutos que transportam derivados de petróleo e álcool também são chamados de polidutos (ANP, 2016).

Os dutos são usados para transporte de líquidos desde a Antiguidade, os chineses usavam bambu; os egípcios e os astecas, material cerâmico; e os romanos, chumbo. O primeiro duto para transporte de hidrocarbonetos, com duas polegadas de diâmetro, foi construído em ferro fundido e ligava um campo de produção a uma estação de carregamento de vagões a uma distância de 8km na Pensilvânia, em 1865. No Brasil, o primeiro duto para transporte de petróleo foi construído na Bahia em 1942, tinha diâmetro de duas polegadas e um quilômetro de extensão, ligava a Refinaria Experimental de Aratu ao Porto de Santa Luzia, que recebia petróleo de saveiros-tanque vindos dos campos de Itaparica e Joanes (SANTANNA, 2004 apud TERZIAN, 2005).

O escoamento de petróleo e derivados entre as fontes de produção, refinarias e centros de consumo pode ser realizado através de navios, caminhões tanque e dutos. Entretanto, os oleodutos, gasodutos e polidutos são geralmente o meio mais econômico para transportar grandes volumes de petróleo, derivados e gás natural por grandes distâncias (FONTES, 2008).

Com mais de 14 mil quilômetros de oleodutos e gasodutos, 47 terminais (20 terrestres e 27 aquaviários) e 56 navios, a Transpetro tem a tarefa de levar aos mais diferentes pontos do Brasil o combustível que move a economia do país. Como subsidiária integral da Petrobras, une as áreas de produção, refino e distribuição do

Sistema Petrobras e presta serviço a diversas distribuidoras e à indústria petroquímica (TRANSPETRO, 2013a).

A operação de terminais de armazenamento e oleodutos é um importante elo na cadeia logística de abastecimento do Sistema Petrobras. Dos campos de produção, o petróleo é transportado, por oleodutos ou por navios, para os terminais da Transpetro e a partir dessas unidades até as refinarias. Após o refino, os derivados são novamente escoados por dutos aos terminais para serem entregues às companhias distribuidoras, que abastecem o mercado nacional de combustíveis.

Para que esse sistema logístico funcione de forma integrada para atender a programação dos clientes em volume e prazos, é fundamental que os equipamentos que o compõe apresentem níveis satisfatórios de confiabilidade e disponibilidade. Os equipamentos típicos que compõe o sistema logístico são: tanque ou esfera de armazenamento, válvulas de bloqueio, válvulas de retenção, válvulas controladoras, bombas auxiliares (*booster*), bombas principais (centrífugas ou alternativas), instrumentação (transmissores de temperatura, pressão, vazão), sistema de automação (CLPs, remotas) e os dutos em si.

1.1.1 Delimitação do Tema

O tema do estudo envolve a análise de um sistema que compreende bombas, oleodutos e unidades operacionais, que transfere petróleo de um terminal de recebimento e armazenamento da Transpetro para abastecimento de refinarias da Petrobras no estado de São Paulo. Um sistema de relevante importância para o abastecimento de gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação da região metropolitana de São Paulo. Destacam-se também outros produtos utilizados por diversos setores da indústria como: nafta petroquímica, aguarrás, propeno, butano desodorizado, solventes especiais, etc.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O problema do sistema em análise é que ele envolve várias unidades operacionais, com características de equipamentos, gestão da manutenção, equipe

de manutenção distintas e devem atuar de forma integrada para proporcionar o escoamento de petróleo até as unidades produtoras de derivados.

A maioria dos equipamentos têm mais de 30 anos de operação, os fornecedores de peças são exclusivos, geralmente os custos de manutenção são altos, e os tempos perdidos em função de logística de peças, equipamentos, podem ser consideravelmente grandes principalmente quando necessário destinar as bombas para manutenção externa ou fabricação de componentes que não existem em estoque.

Todos esses aspectos que atualmente a unidade convive nas atividades de manutenção desses equipamentos têm impacto considerável na disponibilidade e, conseqüentemente, no resultado operacional e financeiro do sistema de petróleo, o qual é um dos mais rentáveis para a gerência geral regional por seu volume movimentado e tarifa de transporte.

Neste sentido, o trabalho busca responder perguntas tais:

- Qual a confiabilidade e disponibilidade atuais do sistema para seus cenários operacionais?
- Esses valores de disponibilidade atendem as necessidades da Programação de Movimentação de Produtos e seus clientes finais?
- Quais os subsistemas têm impactado de forma mais significativa o resultado do sistema nos quesitos de engenharia da confiabilidade?

1.3 OBJETIVOS

Neste tópico, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Modelar o sistema logístico de petróleo do litoral paulista para os cenários operacionais usuais e simular seu comportamento dinâmico com os tempos entre falhas e tempos de reparo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar a disponibilidade, MTBF, tempo indisponível e número de falhas esperados para o sistema.
- Identificar a influência dos subsistemas no tempo indisponível do sistema.
- Identificar a influência dos subsistemas nas paradas operacionais por falhas.
- Classificar os subsistemas que necessitam de tratamento prioritário no plano de gestão estratégica de ativos.

1.4 JUSTIFICATIVA

A Transpetro, como subsidiária integral da Petrobras, tem atuado de forma alinhada à *holding* e com seu plano de negócios. Assim, com o crescimento da demanda de petróleo das refinarias para produção de maiores volumes de derivados, faz-se necessário conhecer a disponibilidade atual do sistema para conferir se está em acordo com a necessidade do cliente. Caso a disponibilidade encontrada esteja abaixo do requerido, necessitar-se-ão implementar medidas de melhorias das condições dos equipamentos seja por otimização dos tempos de manutenção ou adequar a política de gestão de ativos.

Assim, o conhecimento do comportamento dos ativos, suas falhas e impactos na disponibilidade do sistema pode revelar os subsistemas que necessitem de prioridade e atenção nas estratégias de manutenção ou gestão.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Baseando-se nos critérios de classificação de pesquisa descritos em (GIL, 2002) pode-se classificar a pesquisa quanto à área de conhecimento como tecnológica.

Quanto à sua finalidade a pesquisa é aplicada, já quanto aos objetivos gerais e propostos, é exploratória.

Quanto ao método empregado é um estudo de caso com coleta de dados primário buscado com análise de dados de falhas de equipamentos, tratamento posterior em programa de computador específico.

O fluxograma da Figura 1 representa as etapas realizadas para desenvolvimento do trabalho.

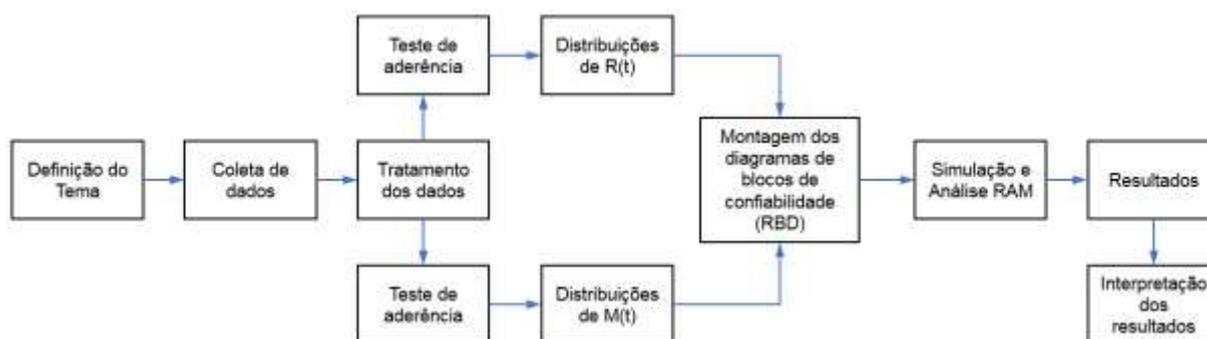


Figura 1 - Fluxograma com as etapas do estudo
Fonte: Autoria Própria

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 iniciou com a introdução do projeto, o tema, objetivos do estudo, mostrando o problema e premissas, a justificativa, e uma breve apresentação da metodologia.

O capítulo 2 apresentará detalhes do processo, do sistema logístico de petróleo e seus principais componentes.

O capítulo 3 explica a metodologia aplicada, com conceitos de confiabilidade, análise de dados de vida, distribuições estatísticas e sistemas reparáveis.

O capítulo 4 demonstra a aplicação da metodologia exposta no capítulo 3 para o sistema, relaciona os dados de falha e reparo dos subsistemas e detalha as distribuições estatísticas de confiabilidade e manutenibilidade encontradas para cada um com auxílio do *software Weibull ++*.

O capítulo 5 apresentará a simulação dinâmica e os resultados obtidos dos diagramas de blocos no *software Blocksim* para os cenários estabelecidos no capítulo 4. As informações relevantes serão apresentadas por meio de gráficos e analisados ao final de cada seção.

Por fim, no capítulo 6 encerra-se o estudo com as considerações finais e proposições de trabalhos futuros para a continuação e aprimoramento da linha de pesquisa iniciada neste trabalho.

2 O SISTEMA OPERACIONAL

Neste capítulo, dar-se-á uma visão geral para apresentação do sistema logístico objeto de estudo e as unidades que o compõe, resumindo o papel de cada uma delas no conjunto.

O sistema tem grande importância no mercado de derivados de petróleo de São Paulo e do Centro Oeste por englobar a entrada do petróleo pelo Terminal de São Sebastião e por abastecer todos os centros produtores de gasolina, óleo diesel S500 e S10, GLP, querosene de aviação e nafta petroquímica do Estado de São Paulo. Após a produção nas refinarias, uma malha de oleodutos no Planalto Paulista realiza a logística de derivados, abastecendo polos de distribuição em Guarulhos, Barueri, São Caetano do Sul, Paulínia, Ribeirão Preto, Uberaba, Uberlândia, Goiânia, até Brasília.

2.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de logística de produtos da indústria petrolífera normalmente têm uma complexidade inferior aos sistemas de produção/prospecção e refino, pois a gama de equipamentos, instrumentos, linhas de transferência e sistemas auxiliares é consideravelmente menor. No entanto, são de extrema importância para a rede de abastecimento do mercado de combustíveis, pois atuam de forma coordenada e sincronizada com os poços de produção, refinarias e navios petroleiros para atender as necessidades dos clientes do mercado de distribuição. Os oleodutos, por apresentar menor custo operacional quando comparado a outros modais, são o meio de transporte preferencial para suprir tanto as refinarias e poços produtores como os grandes centros consumidores de derivados.

O objeto do estudo é o sistema de petróleo do litoral paulista que engloba: unidade de recebimento por navio, tanques de armazenamento, equipamentos de transferência e controle, oleodutos e seus alinhamentos, e que abastece com o insumo 2 das 4 refinarias da Petrobras no estado de São Paulo.

2.2 VISÃO GERAL DA MALHA LOGÍSTICA DE PETRÓLEO DE SÃO PAULO

A malha de oleodutos que deriva do terminal de São Sebastião e realiza o abastecimento de petróleo das refinarias do estado de São Paulo responde por aproximadamente 40% de volume do produto transportado no Brasil (TRANSPETRO, 2015).

A Figura 2 representa, de forma simplificada, o sistema logístico de petróleo que abastece as refinarias produtoras de derivados do estado de São Paulo.

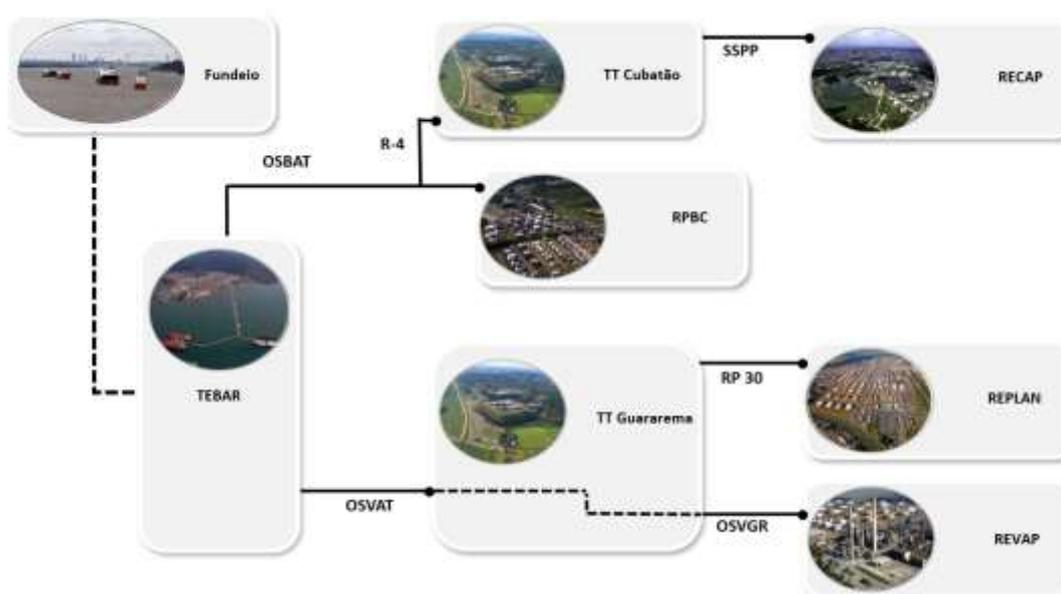


Figura 2 - Diagrama simplificado do sistema de abastecimento de Petróleo de SP
 Fonte: ILOS (2013).

No estudo proposto, entretanto, a análise ficará limitada ao sistema de petróleo do Litoral Paulista, com origem nos tanques do Terminal de São Sebastião (TEBAR), desconsiderando a etapa de recebimento de produto por descarregamento de navios. Tal sistema está representado na Figura 3.

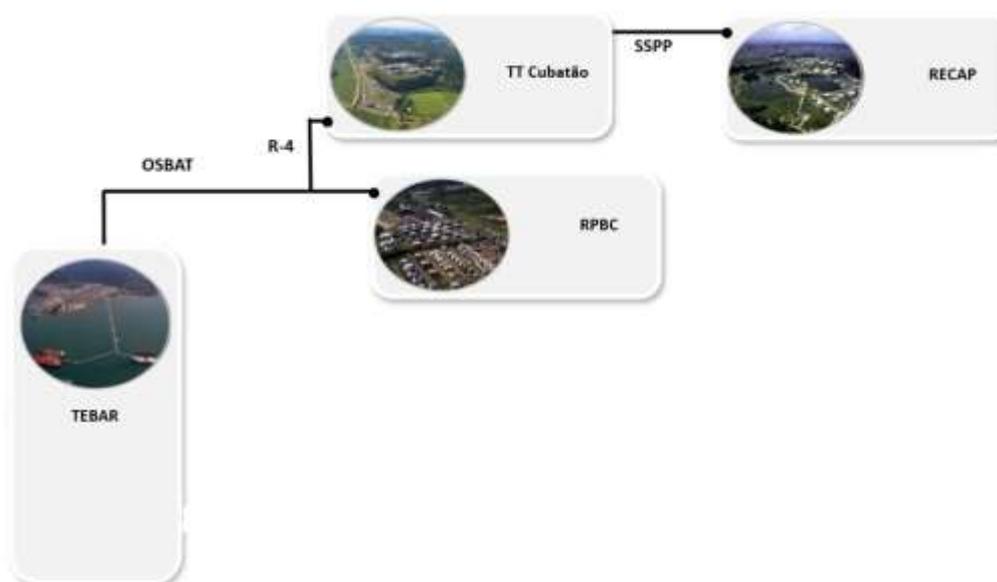
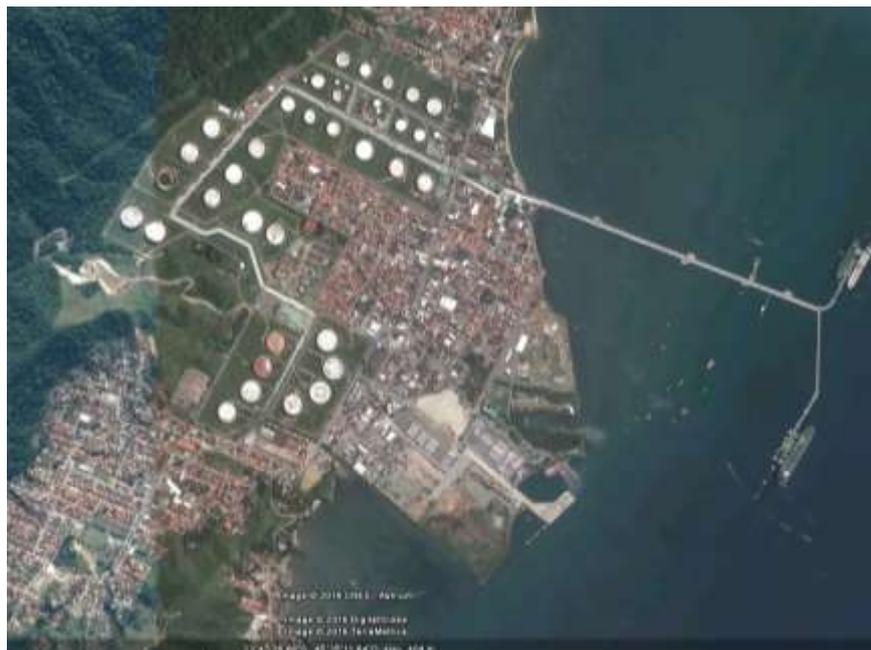


Figura 3 - Sistema de Petróleo do Litoral Paulista
 Fonte: Adaptado de ILOS (2013).

2.3 UNIDADE DE ORIGEM – TERMINAL DE SÃO SEBASTIÃO (TSSE)

A primeira unidade componente do sistema operacional a ser apresentada é o terminal de São Sebastião, conhecida internamente também por seu nome de fundação como: Terminal Almirante Barroso (TEBAR). A partir deste ponto, entende-se o terminal de São Sebastião pelo acrônimo TSSE, ao invés de TEBAR.

Maior unidade operacional da Transpetro em movimentação de produtos, o Terminal de São Sebastião recebe petróleo nacional e importado por navios-petroleiro. Abastece as quatro refinarias do estado de São Paulo: Paulínia (REPLAN), Henrique Lage (REVAP), Capuava (RECAP) e Presidente Bernardes (RPBC). O petróleo é transferido às refinarias por oleodutos, como o São Sebastião-Guararema (OSVAT) que atende as refinarias de Paulínia (REPLAN) e Vale do Paraíba (REVAP); e o Oleoduto Santos-São Sebastião (OSBAT), as refinarias Presidente Bernardes (RPBC) e Capuava (RECAP). Os derivados entram e saem do terminal pelo Oleoduto Guararema-Paulínia (OSPLAN) e por meio de navios, com destino a outros portos do território nacional ou para exportação (TRANSPETRO, 2013b). A Fotografia 1 mostra uma vista aérea dessa unidade.



**Fotografia 1 - Vista aérea do terminal de São Sebastião.
Fonte: Google Earth (2016).**

O petróleo é recebido no terminal de São Sebastião exclusivamente por meio de modal naval. Os navios atracam nos píeres e, por meio de conexões a braços de carregamento, transferem os produtos através de sistemas de tubulações e alinhamento de válvulas para os tanques atmosféricos de armazenamento. Em cada píer (Norte e Sul), há uma sala de controle que conta normalmente com 2 operadores para acompanhamento das operações, liberações, conexões e desconexões dos braços, etc. A Fotografia 2 mostra uma visão dos píeres citados.



**Fotografia 2 - Píeres de atracação de navios
Fonte: Transpetro (2013c)**

Após o recebimento do petróleo dos navios para os tanques de armazenamento, o produto passa por etapas de repouso e drenagem de água de formação, amostragem e análise laboratorial de qualidade e especificação. Se as características do petróleo recebido em determinado tanque estiverem em conformidade aos requisitos mínimos de qualidade e especificação da Petrobras, esse volume de petróleo do tanque está certificado e liberado para que a Logística Transpetro faça a programação de operação de expedição para uma das quatro refinarias do estado de São Paulo já citadas, por meio dos sistemas de oleodutos OSBAT, OSVAT ou OSPLAN.



Fotografia 3 - Exemplo de tanque de armazenamento de petróleo
Fonte: Petrobras (2013)

O terminal conta com diversos tanques de armazenamento como o da Fotografia 3, de tal modo a garantir que as etapas de repouso e certificação de produto ocorram conforme padrões internos e também que haja um estoque suficiente do produto para suprir a logística de abastecimento das 4 refinarias.

A seguir, representa-se a configuração, em forma de fluxograma, do trecho inicial do sistema. A Figura 4 representa tela retirada do sistema de supervisão e controle do terminal que contempla parte dos tanques de petróleo e suas linhas de derivação que podem abastecer os oleodutos supracitados.



Figura 4 – Tela de tanques de petróleo e alinhamentos, oriunda do sistema supervisório.
Fonte: Autoria própria.

Para expedir volumes de produto para o oleoduto OSBAT, os tanques da Figura 4 devem ter suas válvulas do *manifold* alinhadas para as linhas L03 e L06, conforme destacado pelas linhas vermelhas.

A Figura 5 representa a continuação da representação anterior, na qual as linhas L03 e L06 derivam para um sistema de mistura, que tem como função realizar o *blend* de produtos de características distintas para obter uma especificação ideal para atender as necessidades de produção da refinaria consumidora dessa mistura, proporcionando assim que ela produza quantidades maiores de gasolina ou de diesel, por exemplo.

Após a mistura, o produto passa por filtros para retenção de resíduos grosseiros, para então alimentar a sucção das bombas auxiliares (*booster*) BA-3207 A/B/C que operam em configuração 2-de-3 e, por fim, as bombas principais B-3208 A/B/C/D que realizam a expedição do produto para o oleoduto OSBAT em configuração 3-de-4.

Após sair do terminal, o oleoduto percorre um trecho de aproximadamente 62 km seguindo o traçado do litoral paulista, até chegar na unidade intermediária de recalque, a estação de Guaratuba.

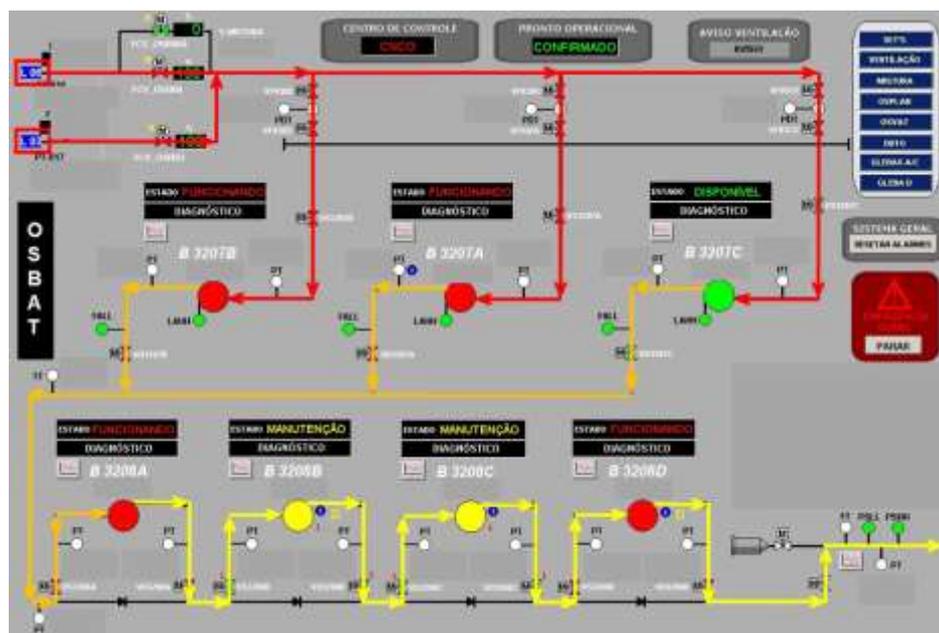


Figura 5 - Sistema de Mistura, Bombas Auxiliares e Bombas Principais do OSBAT, oriundo do sistema supervisorio
Fonte: Autoria Própria

2.4 A ESTAÇÃO DE RECALQUE DE GUARATUBA - GRT

Nesta estação há 2 bombas centrífugas que operam na configuração 1-de-2. A unidade é desassistida e operada remotamente e tem grande importância para o sistema de petróleo, pois proporciona um ganho de vazão da ordem de 30%. A indisponibilidade operacional da estação ou do sistema de bombas representa uma falha de atendimento à programação, com possíveis impactos nas unidades consumidoras subsequentes.

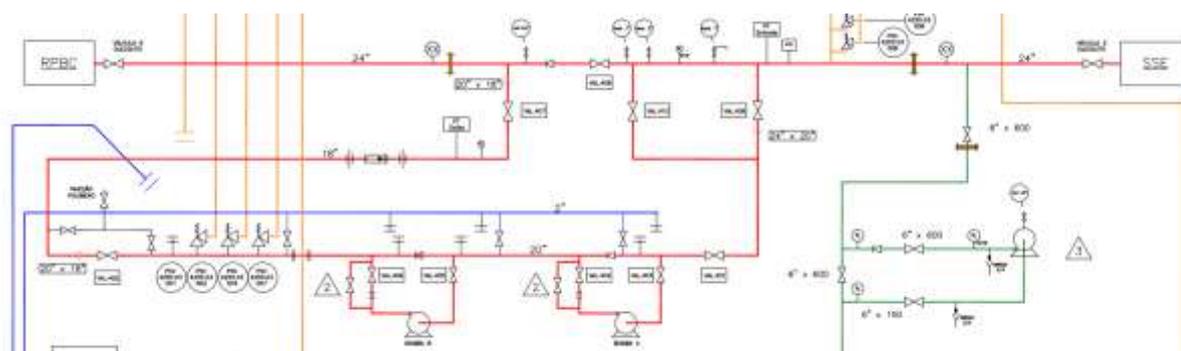
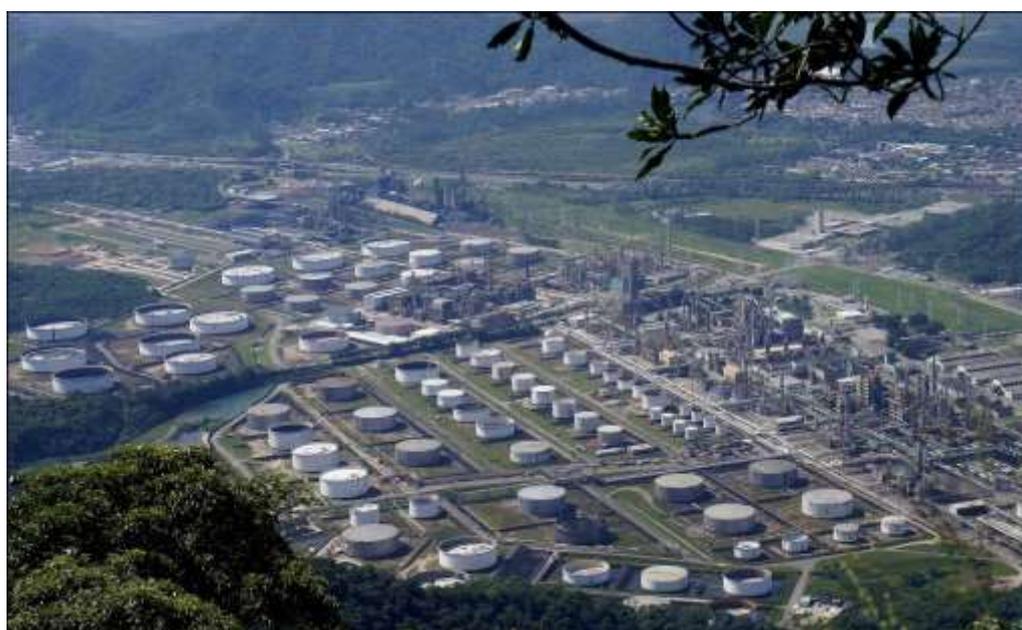


Figura 6 – Fluxograma Operacional da Estação de Guaratuba
Fonte: Adaptado de TRANSPETRO (2007).

A linha vermelha na Figura 6 indica o sistema de petróleo. Após a saída da estação de Guaratuba, o oleoduto OSBAT percorre mais 61,5 km até o *scraper* de chegada da refinaria Presidente Bernardes (RPBC).

2.5 A REFINARIA PRESIDENTE BERNARDES - RPBC

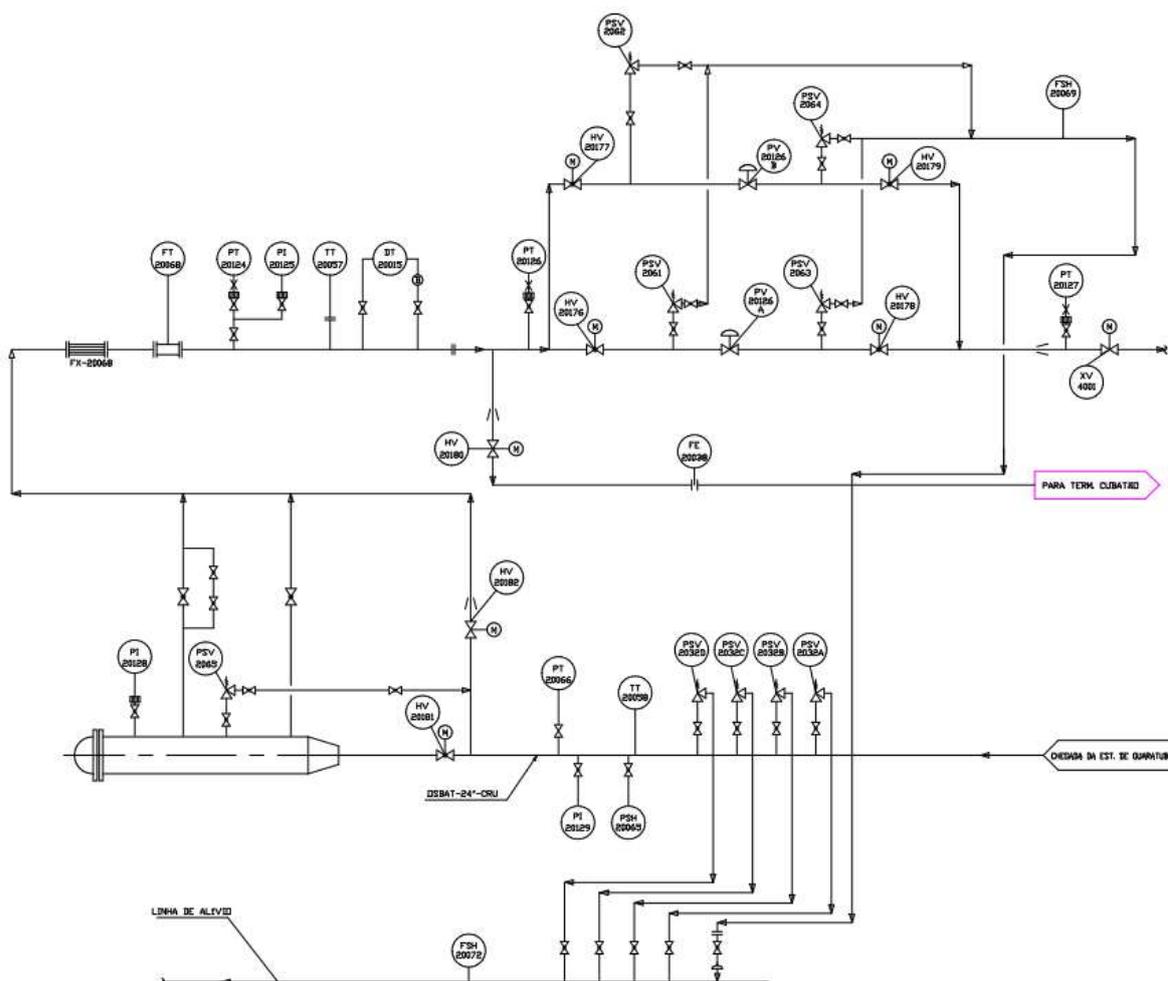
A Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), unidade do sistema Petrobras situada em Cubatão/SP, está localizada a 55 km da cidade de São Paulo e responde por aproximadamente 8% do processamento de petróleo no país. Instalada em uma área de 7 milhões de m², a RPBC processa 27 mil m³/dia de petróleo e é considerada uma unidade com alta capacidade de conversão, produz uma variedade de derivados de grande valor comercial, como solventes, coque, nafta petroquímica, óleo diesel etc. É a única produtora de gasolina de aviação no Brasil, combustível usado em aviões de pequeno porte com motores a pistão, semelhantes aos dos carros. Por ser uma refinaria costeira, a unidade atende a parte do mercado de cabotagem das regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul, e abastece uma parcela do mercado da Grande São Paulo (PETROBRAS, 2015).



Fotografia 4 - Vista da Refinaria Presidente Bernardes
Fonte: Prado (2014)

No *scraper* de chegada do oleoduto OSBAT na refinaria, há 2 opções para o alinhamento de produtos: 1) Recebimento nos tanques de armazenamento (para produção própria) e 2) Expedição para o terminal de Cubatão (para logística e abastecimento da refinaria de Capuava (RECAP).

O fluxograma operacional dos alinhamentos internos está representado Figura 7. As caixas destacadas em magenta indicam a continuação do alinhamento no desenho posterior.



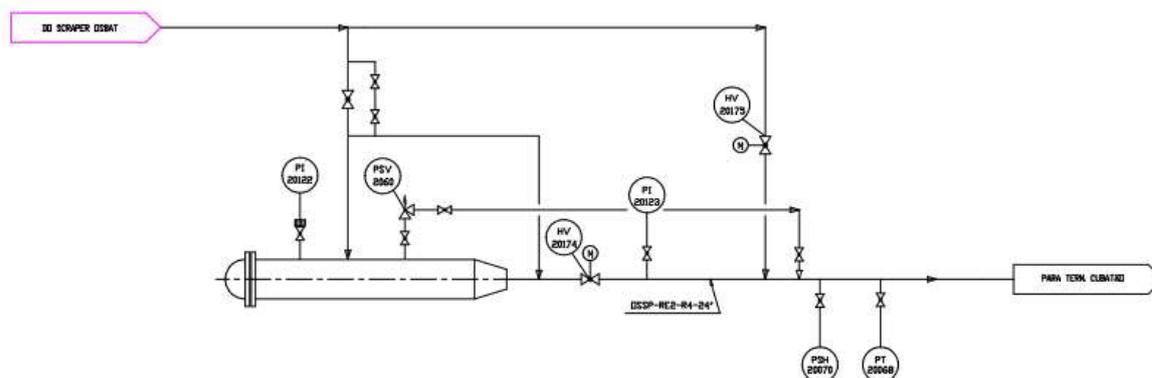


Figura 7 - Fluxograma do sistema de petróleo na refinaria RPBC
Fonte: Adaptado de PETROBRAS (2001)

Quando ocorre o alinhamento 2, o oleoduto OSBAT é interligado ao oleoduto R4 e tem seu fluxo direcionado para o terminal de Cubatão.

2.6 TERMINAL TRANSPETRO DE CUBATÃO - TCUB

O Terminal de Cubatão é uma unidade estratégica para a logística de produtos da área de Abastecimento da Petrobras pois interliga a Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), a Baixada Santista e o mercado consumidor de derivados do Planalto Paulista. É utilizado como parque de armazenamento intermediário e recalque, abastecendo com derivados claros o Terminal de Santos, derivados claros o terminal de São Caetano e com petróleo a Refinaria de Capuava (RECAP). A Fotografia 5 apresenta uma vista de parte do terminal e de seus tanques de armazenamento.



Fotografia 5 - Terminal de Cubatão
Fonte: TRANSPETRO (2013d)

Na Figura 8, mostra-se os tanques de armazenamento da unidade, bem como os alinhamentos de recebimento (linha vermelha) e envio para as bombas auxiliares (linha amarela). Os tanques de Cubatão, em função da vazão de recebimento ser superior à de expedição para RECAP, opera majoritariamente em pulmão, ou seja, as operações de recebimento e expedição ocorrem simultaneamente. Razão pela qual os tanques serão desconsiderados da análise posterior.

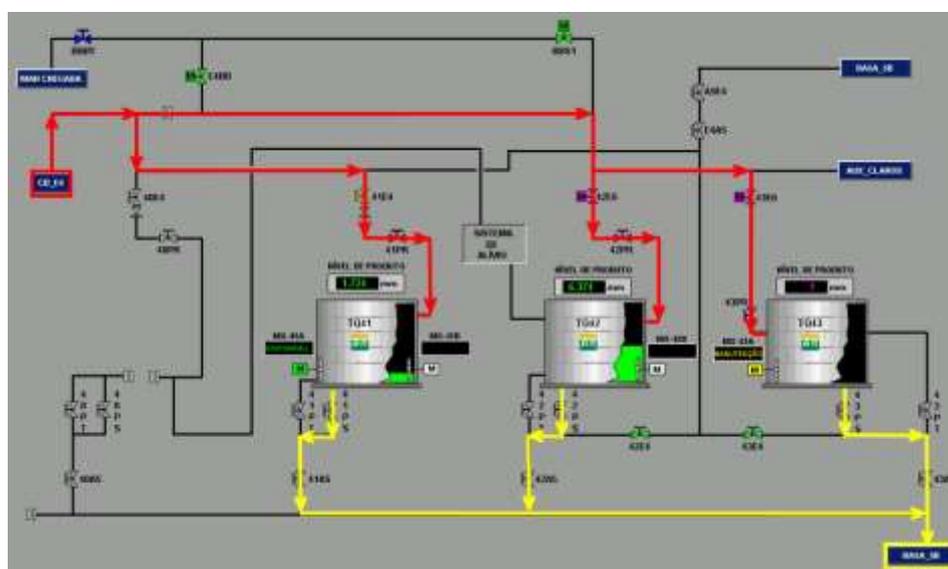


Figura 8 – Tanques de petróleo representados no sistema supervisório
Fonte: Autoria Própria

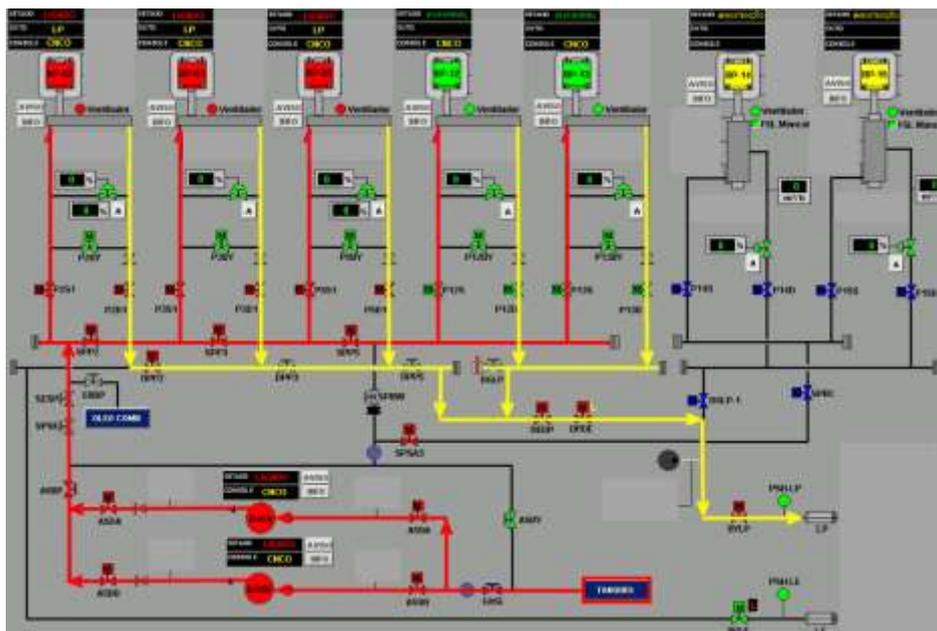


Figura 9 – Bombas de petróleo do terminal de Cubatão, oriundo do sistema supervisório
Fonte: Autoria própria

Na Figura 9, tem-se a continuação com as bombas auxiliares BA-05 A/B que operam em configuração 2-de-2 e as bombas alternativas principais BP-02/03/05/12/13 que operam em configuração preferencial 4-de-5. As linhas em vermelho representam os trechos de sucção das bombas principais e, as linhas em amarelo representam os trechos de descarga para o oleoduto OSSP P.

2.7 REFINARIA DE CAPUAVA - RECAP

A refinaria de Capuava começou as operações em 18 de dezembro de 1954, inicialmente como empresa privada, sendo incorporada à Petrobras em 3 de junho de 1974. Pela facilidade de obtenção de matérias-primas na região, sua instalação em Mauá atraiu outras indústrias, formando o Pólo Petroquímico do Grande ABC. Com uma área total de 3,7 milhões de m², a RECAP tem capacidade para processar diariamente 53 mil barris/dia de petróleo (aproximadamente 8.500 m³/dia). Para sua produção, conta com as unidades de destilação atmosférica, de Craqueamento Catalítico Fluido de Resíduo (URFCC), desaromatização de solventes, solventes especiais, tratamento de água, geração de vapor, energia e ar comprimido. A RECAP abastece o Polo Petroquímico do Grande ABC e ainda 30% da região metropolitana de São Paulo. Atualmente, as principais produções feitas pela RECAP

são a gasolina, diesel S-10 e S-50, propeno, gás liquefeito de petróleo (GLP) e solventes especiais (PETROBRAS, 2014).

A RECAP, ilustrada na Fotografia 6, é a unidade consumidora final, tendo como operação destacada no trabalho apenas sua etapa de recebimento de petróleo nos tanques de armazenamento.



Fotografia 6 - Vista da refinaria de Capuava
Fonte: Bonacin (2011).

No contexto do trabalho, a unidade tem impacto nas operações pois eventuais problemas no scraper de recebimento como falha na válvula de controle ou falta de energia podem paralisar a operação do duto OSSP P, que o interliga ao terminal de Cubatão.

3 CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Neste capítulo, apresenta-se uma breve introdução dos conceitos de confiabilidade aplicados ao desenvolvimento do estudo.

Primeiramente, o trabalho tem seus fundamentos nos princípios de análise de dados de vida (LDA), na qual para se modelar o comportamento de vida de equipamentos, é necessário possuir informações operacionais gerais destes ativos, como o tempo e o modo de operação, o histórico de falhas e o tempo em que ele ficou em manutenção (BILLINTON e ALLAN, 1983).

Posteriormente, aplicar-se-á os conceitos de diagramas de blocos de confiabilidade (RBD) com os modelos de confiabilidade ($R(t)$) e manutenibilidade ($M(t)$) para então efetuar-se uma análise RAM do sistema logístico de petróleo do litoral paulista, com objetivo de conhecer parâmetros importantes de seu comportamento como disponibilidade, confiabilidade, MTBF, número de falhas esperadas e horas indisponíveis.

3.1 CONTEXTO DA CONFIABILIDADE

O mundo passa por mudanças tecnológicas em ritmo cada vez mais acelerado. Esse aumento na velocidade de desenvolvimento, aliado às mudanças conceituais das cadeias produtivas, tem como consequência o aumento da competição em escala global e padrões de consumo, qualidade de produtos e serviços e segurança para usuários e consumidores.

Nesse contexto, as empresas têm se aprimorado e buscado a melhoria contínua nos seus sistemas de gestão de ativos para torná-los cada vez mais fortes e flexíveis de tal modo que possam produzir mais, com padrão de qualidade cada vez melhor e otimizando os custos para que se mantenham competitivos no mercado.

O conceito de confiabilidade é muito relacionado ao de qualidade e encaixa-se perfeitamente com a ideologia do mercado atual pois, sob diversos aspectos, tem impacto na confiança e satisfação do consumidor durante a compra de um bem ou serviço.

Do outro lado, a confiabilidade também é cada vez mais um conceito que se difunde na cadeia de produção, onde os tempos de parada por quebras, falhas, desgaste e regulagem de equipamentos influenciam o resultado operacional e, conseqüentemente, o custo final do serviço/produto ao consumidor final. Sob esse aspecto, a engenharia de confiabilidade aplicada à manutenção dos ativos tem ganhado relevância e destaque ao longo das últimas décadas (BASSETTO, 2007).

A engenharia de confiabilidade, aplicada por meio de sua análise de confiabilidade, tem como aspecto fundamental a avaliação probabilística do risco de falha de um componente, subsistema ou sistema de produção. Aliada a outras metodologias qualitativas e quantitativas de avaliação de riscos e causas de falhas, indica os pontos de um produto, sistema ou equipamento que têm potencial de melhoria, assim, pode-se definir ações preventivas ou corretivas mais eficientes para a elevação do grau de desempenho total (SALLES, 2014).

Para que seja feito um estudo da confiabilidade é preciso que se saiba alguns aspectos importantes de um equipamento ou sistema: sua natureza probabilística, sua dependência do tempo, o que consiste em “sucesso” ou “insucesso” e a especificação das condições operacionais. Assim um dos objetivos da confiabilidade é o de estabelecer a margem de segurança a ser utilizada, pois no projeto tradicional o coeficiente de segurança é de uma escolha um pouco arbitrária por não se conhecer todas as variáveis do projeto (SALLES, 2014).

A confiabilidade é uma ferramenta útil para se resolver determinados problemas, pois ela fornece parâmetros com os quais se consegue tomar decisões mais consistentes, além de aumentar os lucros, pois reduz as paradas não programadas, custos de manutenção e, também, reduz as possibilidades de acidentes. Outro ponto importante é que possibilita a realização dos investimentos com base em informações quantitativas e que sejam tomadas ações contra as causas básicas dos problemas (considerando-se os históricos de falhas dos equipamentos, a determinação das causas básicas das falhas, a prevenção de falhas em equipamentos similares, a determinação dos fatores críticos para a manutenibilidade dos equipamentos). Assim como controle de materiais, análise de falhas em serviço e estratégias de reposição e de apoio (SALLES, 2014).

Várias empresas já estão cientes do custo da não-confiabilidade. Quando o produto falha muitas vezes no período de garantia, o fabricante terá que se responsabilizar pelos altos custos para resolver estes defeitos resultando na

insatisfação dos clientes com a situação, além da repercussão negativa sobre sua imagem e marca.

Segundo Lafraia (2001 apud SALLES, 2014, pg. 27), todo processo possui um gasto teórico ótimo na confiabilidade em relação ao benefício subsequente, na prática encontrar este gasto mínimo é muito difícil. Algumas características que influenciam na confiabilidade do processo e no custo de operação da planta são as diferenças de qualidade no projeto ou mesmo diferenças na maneira com que estes aspectos da confiabilidade foram administrados.

Nesse sentido, a qualidade é um aspecto que merece atenção principalmente durante a etapa de desenvolvimento de um ativo pois a qualidade do projeto pode determinar a confiabilidade e manutenibilidade durante seu ciclo de vida e, conseqüentemente, os custos decorrentes de paradas de manutenção, afetando assim, o resultado operacional da unidade.

3.2 CONCEITOS DE FUNÇÕES

3.2.1 Definição de Funções

Segundo Siqueira (2005), as funções são resultados das ações que os sistemas e equipamentos fazem ou devem fazer, é a finalidade para qual um sistema (equipamento) foi projetado.

3.2.2 Funções Primárias

Funções primárias são as funções para qual o sistema foi projetado para funcionar, ou seja, é o resultado principal que se espera deste equipamento dentro de uma fábrica, por exemplo. Logo, receberá maior prioridade quanto a programação dos planos de manutenção para garantir o bom funcionamento do mesmo (SIQUEIRA, 2005).

3.2.3 Funções Secundárias

Todos os equipamentos possuem funções secundárias, seu objetivo é auxiliar as execuções do trabalho das funções primárias logo devem receber os devidos cuidados para não gerar consequências indesejadas para o sistema (SIQUEIRA, 2005).

3.2.4 Funções de Proteção

As funções de proteção agem normalmente como funções primárias, tentam garantir que uma falha da função protegida resulte em efeitos menores do que se não houvesse a mesma. Seu objetivo é a proteção de algo e garantia de segurança para todos os envolvidos no processo, seu monitoramento determina o funcionamento do sistema de acordo com nível de segurança que o sistema exige (SIQUEIRA, 2005).

3.3 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

A seguir, estão relacionadas definições de confiabilidade segundo algumas entidades e autores:

European organization for quality control (1965): "É a medida da capacidade de um produto funcionar corretamente, por um período e em ambiente definidos e é avaliada como uma probabilidade" (Carter, 1986, pg. 4).

US military handbook (1970): "A probabilidade que um item irá executar sua função sobre determinadas condições e durante um determinado período de tempo" (Carter, 1986, pg. 4).

UK Ministry of defense (1979): "A aptidão de um item em executar, ou ser capaz de executar, uma determinada função sobre determinadas condições sem falhar por um período de tempo estabelecido ou de operação é também expressa como uma probabilidade" (Carter, 1986, pg. 4).

Confiabilidade vem sempre ligada aos conceitos de Manutenibilidade e Disponibilidade, onde manutenibilidade é a facilidade com que um equipamento pode

ser mantido e disponibilidade é o tempo que o mesmo está apto a operar durante um determinado período (PALLEROSI, 2006).

Segundo Birolini (2007), confiabilidade é uma característica de um item, expressa pela probabilidade de que o item irá executar a sua função, nas condições dadas para um intervalo de tempo indicado.

O termo confiabilidade é popularmente relacionada a conceitos como confiança no equipamento, durabilidade, agilidade em operar sem falhas, no entanto matematicamente confiabilidade é explicada como a probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema opere com sucesso por um período de tempo pré-determinado e sob condições de operação específicas.

Testes de confiabilidade possibilitam, por meio de estimativa, com base em estudos de confiabilidade, caracterizar os comportamentos de confiabilidade, da probabilidade de falha e da taxa de falha em relação ao tempo de um componente ou sistema.

No caso de um estudo de confiabilidade em relação a um determinado grupo de falhas, testes de confiabilidade permitem: a melhoria da qualidade; o estudo sobre aspectos relacionados à fixação do período de garantia; ou a reposição de componentes defeituosos de um produto já em produção. Estes testes permitem a obtenção de uma quantidade de elementos suficientes para atender as exigências de critérios estatísticos quanto a compor uma amostra para ensaio de falhas.

3.4 CONCEITOS DE FALHA

Baseado na ideia de confiabilidade, pode-se definir a falha como a incapacidade de um componente, equipamento ou sistema desempenhar sua função de acordo com o especificado. Segundo Pinto e Xavier (2005), falha pode ser entendida como a cessação da função de um item ou incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto.

As falhas podem surgir por várias razões como:

- Erro de projeto, construção, instalação ou uso;
- Envelhecimento;
- Desgaste;

- Corrosão.

O cálculo da probabilidade de um componente, equipamento ou sistema de falhar é o inverso da confiabilidade.

Pallerosi (2007) descreve as classificações de falhas quanto ao modo, efeito e causa. O modo descreve como a falha pode ocorrer, o efeito da falha como o modo afeta o uso ou operação do componente e a causa é o motivo da ocorrência ou degradação.

Para Siqueira (2005), as falhas são classificadas sob vários aspectos, tais como origem, extensão, velocidade, manifestação, criticidade ou idades. A Figura 10 relaciona estes aspectos quando a sua classificação.

De acordo com Lafraia (2001), as etapas de vida de um componente, equipamento ou sistema são normalmente descritos pela curva da banheira, contudo é preciso que a taxa de falhas seja definida como a probabilidade de ocorrência de uma falha em período específico, contando que o item em questão opere até o início do referido período. A taxa de falhas é geralmente representada por λ .

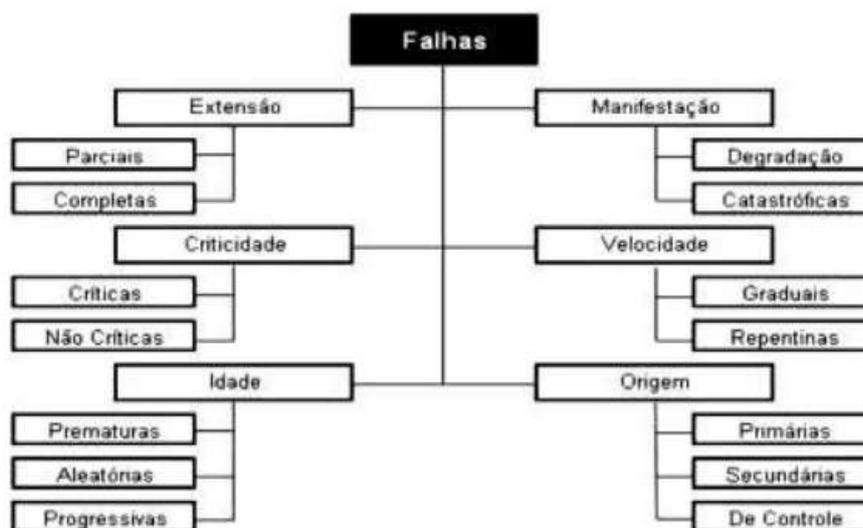


Figura 10 - Classificação das falhas
 Fonte: Siqueira (2005)

3.5 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Para a realização de um controle mais efetivo sobre as máquinas, no que se refere aos assuntos relacionados aos modos de falhas e a disponibilidade do equipamento para fabricação, surge necessidade da elaboração de um planejamento de atividades da equipe de manutenção embasada em uma coleta de informações baseada em históricos e, com as ferramentas ou instrumentos apropriados, em previsões (Plano mestre da manutenção) (FILHO, 2005).

A realização de um plano de manutenção sustentável está relacionada à construção de um banco de dados de vida da máquina em análise, que seja confiável, e que poderá ser chamado de histórico de manutenção. Torna-se necessária a criação de um sistema que registre todas as informações relevantes aos dados de vida da máquina, por exemplo, quando e como ocorreu a anomalia no sistema e quais foram as ações realizadas para a erradicação da falha (FILHO, 2005).

Para o abastecimento correto de um banco de dados da manutenção, julga-se necessário o conhecimento da natureza das falhas em análise.

Considerando o caráter eminentemente aleatório do processo de falha algumas funções estatísticas ou modelos podem ser utilizadas para descrevê-lo. A partir destes modelos podem-se extrair informações importantes quanto à frequência, concentração e distribuição das falhas. Estes modelos podem ser contínuos ou discretos. As distribuições estatísticas mais comuns para isso são a: exponencial, log-normal, normal, Weibull dentre outras. Sendo que esta última devido às suas características de adaptação a vários modos de falha é muito utilizada no processo de obtenção das métricas de confiabilidade, função densidade de probabilidade, função de probabilidade acumulada, função confiabilidade, função de não confiabilidade, função taxa de falha.

Como ferramenta para avaliar o modo de falha encontrado em uma máquina ou componente, a análise estatística por meio de dados de campo ou de ensaios é uma ferramenta muito importante para que sejam obtidas previsões que viabilizam a tomada de decisão antes do acontecimento de novas falhas. Assim a utilização desta ferramenta permite determinar as falhas prematuras (Mortalidade infantil), as falhas aleatórias (Situações não usuais) e a fase de falhas por desgaste. Todas estas informações são importantes para a determinação do planejamento da

manutenção sobre a máquina e para a análise dos dados de vida em relação a sua confiabilidade (LAFRAIA, 2001).

Segundo Reliasoft (2015a), ao realizar a análise de dados de vida (também comumente referida como análise Weibull), o profissional tenta fazer previsões sobre a vida de todos os produtos na população ajustando uma distribuição estatística (modelo) para dados de vida a partir de uma amostra representativa das unidades. A distribuição parametrizada para o conjunto de dados pode então ser utilizada para estimar importantes características de vida do produto, tais como a confiabilidade ou a probabilidade de falha em um momento específico, a vida média e a taxa de falha. Análise de dados de vida exige que o profissional execute os seguintes passos:

1. Reunir dados de vida do produto.
2. Selecione uma distribuição de tempo de vida que irá ajustar os dados e modelar a vida útil do produto.
3. Estime os parâmetros que irão ajustar a distribuição aos dados.
4. Gerar gráficos e resultados que estimam as características de vida do produto, tais como a confiabilidade ou vida média.

3.6 PRINCIPAIS DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS

Para modelar o comportamento das funções de confiabilidade, densidade de probabilidade dos tempos de falha e da função probabilidade, ao longo da vida de um equipamento, existem diversas distribuições de probabilidade. Segundo Pallerosi (2007) as principais distribuições estatísticas para análise de confiabilidade são: Normal, Lognormal, Exponencial e Weibull.

Para o caso de análise de falhas, a distribuição normal mostra uma concentração em torno da média, a lognormal a concentração é deslocada da média, a exponencial mostra uma probabilidade aleatória e a distribuição Weibull é a mais geral, e sua curva representa todas as demais citadas.

3.6.1 Distribuição Normal

Segundo Reliasoft (2015a), a distribuição normal, também conhecida como distribuição Gaussiana, é a distribuição mais amplamente utilizada para propósitos gerais. É por esta razão que ela está incluída entre as distribuições de vida comumente usadas para confiabilidade e análise de dados de vida. Há alguns que argumentam que a distribuição normal é inadequada para modelagem de dados de tempo de vida porque o limite esquerdo da distribuição se estende até o infinito negativo. Isto poderia resultar na modelagem de tempo de falha negativos. Contudo, desde que a distribuição tenha uma média relativamente elevada e desvio padrão relativamente pequeno, a questão dos tempos de falha negativos não deve apresentar-se como um problema.

Para Lewis (1996), esta distribuição representa equipamentos que sofrem desgaste crescente, de forma que a taxa de falha apresenta uma curva crescente em função do tempo.

A função densidade de probabilidade (*pdf*) nesta distribuição é dada por:

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

Onde:

μ = média dos tempos de falha, também notada como \bar{T} .

σ = desvio padrão para os tempos de falha

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2)$$

A função distribuição acumulada (*cdf*) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (3)$$

A taxa de falha instantânea é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx} \quad (4)$$

A Figura 11 mostra a curva característica da $f(t)$ para a distribuição normal:

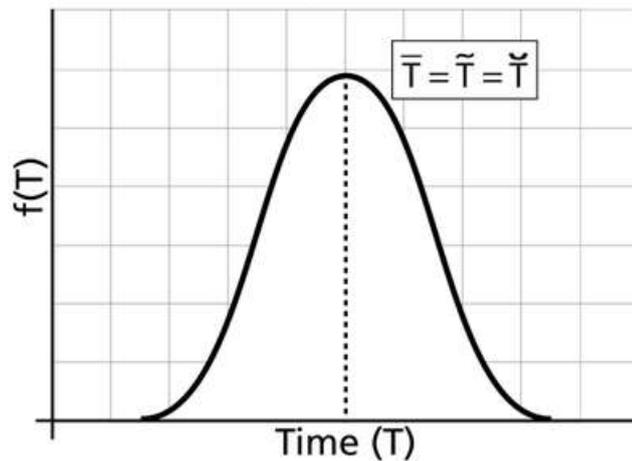


Figura 11 - Distribuição normal de probabilidade
Fonte: Reliasoft (2015a)

A Figura 12 apresenta o comportamento da pdf com a variação do valor do desvio padrão σ .

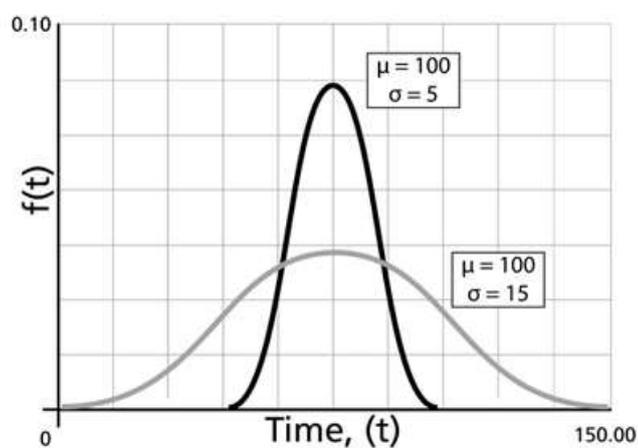


Figura 12 – Efeito de σ na curva pdf da distribuição normal
Fonte: Reliasoft (2015a)

3.6.2 Distribuição Lognormal

Segundo Reliasoft (2015a), a distribuição lognormal é comumente usada para modelar a vida de unidades cujos modos de falha são de uma natureza de tensão de fadiga. Conforme pode ser suposto pelo nome, a distribuição lognormal tem semelhanças com a distribuição normal. Uma variável aleatória é “lognormalmente” distribuída se o logaritmo da variável aleatória é normalmente distribuído. Devido a isso, há muitas semelhanças matemáticas entre as duas distribuições.

Para Carter (1986), esta distribuição é a que melhor define o comportamento de equipamentos mecânicos sobre a ação de fadiga.

A distribuição lognormal é a que melhor descreve o tempo de vida de componentes semicondutores cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos, sendo também adequada para mecanismos de fadiga em materiais (FREITAS, COLOSSIMO; 1997).

A função densidade de probabilidade (*pdf*) nesta distribuição é dada por:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} \quad (5)$$

Onde:

$t' = \ln(t)$, no qual t são os tempos para falha

μ' = média dos logaritmos naturais dos tempos para falha

σ' = desvio padrão para logaritmos naturais dos tempos para falha

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx \quad (6)$$

A função distribuição acumulada (*cdf*) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx \quad (7)$$

A taxa de falha instantânea é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{t \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2}}{\int_{t'}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx} \quad (8)$$

A Figura 13 mostra a curva característica da $f(t)$ para a distribuição lognormal, para diferentes valores de μ' :

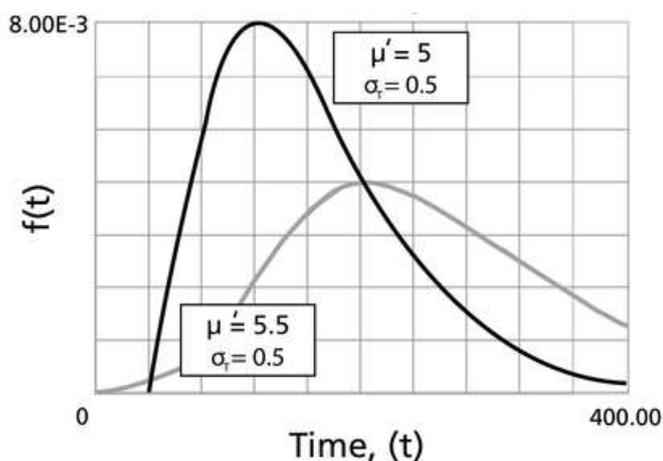


Figura 13 – Efeito da variação de μ' na *pdf* da distribuição lognormal
Fonte: Reliasoft (2015a)

A Figura 14 apresenta o comportamento da *pdf* com a variação do valor do desvio padrão σ .

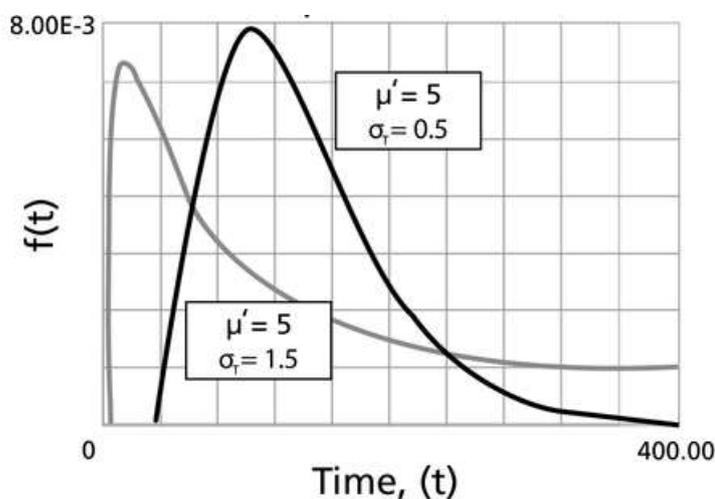


Figura 14 – Efeito de σ' na curva *pdf* da distribuição lognormal
Fonte: Reliasoft (2015a)

3.6.3 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é uma distribuição comumente usada na engenharia de confiabilidade. Matematicamente, é uma distribuição simples, o que muitas vezes leva ao seu uso em situações inadequadas. Trata-se, de fato, de um caso Weibull distribuição onde $\beta = 1$. A distribuição exponencial é usada para modelar o comportamento de unidades cuja taxa de falha é constante (ou unidades que não se degradam com o tempo ou desgaste) (RELIASOFT, 2015a).

A função densidade de probabilidade (*pdf*) na distribuição exponencial de 1 parâmetro é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \lambda > 0 \quad (9)$$

Onde:

λ = taxa constante, em falhas por unidade de medida (ex: falhas por hora)

t = tempo de operação, vida, idade, em horas, ciclos, milhas, atuações, etc.

A função confiabilidade da distribuição exponencial de 1 parâmetro é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

A função distribuição acumulada (*cdf*) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (11)$$

A taxa de falha instantânea é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (12)$$

A Figura 15 mostra a curva de $f(t)$ para a distribuição exponencial 1 parâmetro, para diferentes valores de λ :

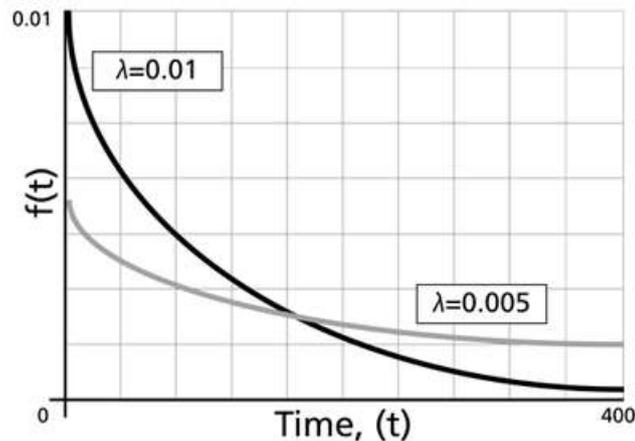


Figura 15 – Efeito da variação de λ na *pdf* da distribuição exponencial
Fonte: Reliasoft (2015a)

3.6.4 Distribuição Weibull

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente por Waloddi Weibull (1951) em estudos relacionados ao tempo de falha devido à fadiga em metais. Ela é frequentemente empregada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. Ela também descreve adequadamente o tempo de vida de produtos formados de várias partes (elementos) cuja falha ocorre quando a primeira parte falhar. Outra vantagem da aplicação da distribuição de Weibull em aplicações práticas deve-se ao fato de ela apresentar uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a função taxa de falha é monótona. Isto significa que ela pode ser crescente, decrescente ou constante. Ela descreve adequadamente a vida de mancais, componentes eletrônicos, cerâmicas, capacitores dielétricos, etc. (FREITAS, COLOSSIMO; 1997)

A função densidade de probabilidade (*pdf*) na distribuição Weibull de 3 parâmetros é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (13)$$

Onde:

$$f(t) \geq 0, t \geq 0 \text{ ou } \gamma; \beta > 0; \eta > 0; -\infty < \gamma < \infty$$

E:

β = parâmetro de forma;

η = parâmetro de escala, ou vida característica

γ = parâmetro de posição ou deslocamento (ou vida livre de falhas)

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (14)$$

A função distribuição acumulada (*cdf*) é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (15)$$

A taxa de falha instantânea é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (16)$$

A distribuição Weibull tem como característica sua versatilidade pois o parâmetro β (fator de forma) pode fazê-la assumir as características de outras distribuições de confiabilidade. Como exemplo, quando o parâmetro β assume o valor 1, a distribuição Weibull comporta-se como uma distribuição exponencial. Para assumir o comportamento próximo ao da distribuição normal, o fator de forma deverá assumir valores por volta de 3,5.

A Figura 16 mostra o efeito da variação dos valores do parâmetro de forma β no comportamento da curva pdf, para β menor que 1, igual a 1 e maior que 1.

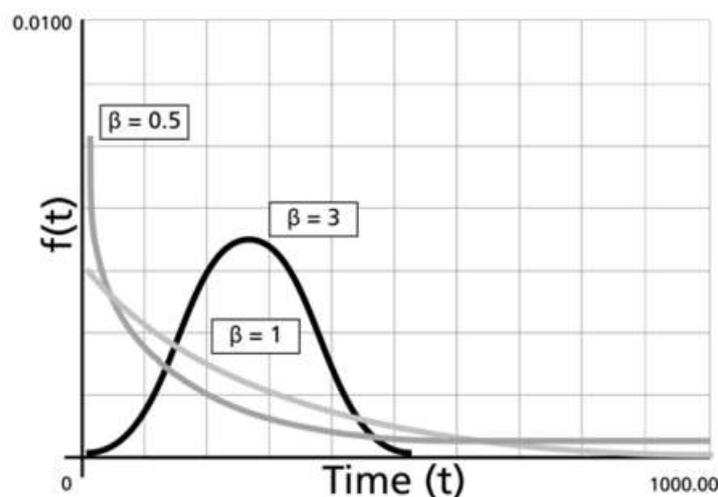


Figura 16 – Efeito da variação de β na pdf da distribuição Weibull
Fonte: Reliasoft (2015a)

O gráfico das curvas *pdf* acima mostra claramente a influência que o parâmetro de forma exerce sobre o comportamento da confiabilidade. Observa-se que nas faixas de tempo próximas a zero, a curva de $\beta \leq 1$ tem comportamento estritamente decrescente com o tempo, enquanto $\beta = 3$ tem semelhante à de uma função normal, com grande concentração de valores $R(t)$ próximos a uma média, o que representa maior previsibilidade na ocorrência de falha do elemento.

A Figura 17 demonstra a influência do parâmetro de forma β na curva da função confiabilidade $R(t)$.

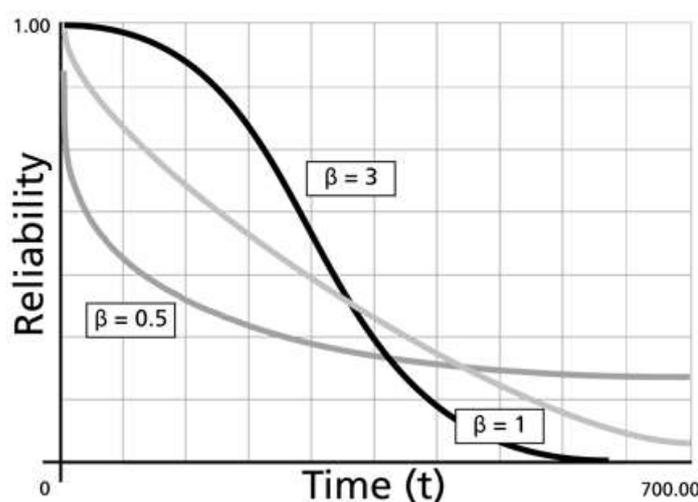


Figura 17 – Efeito da variação de β na função $R(t)$ da distribuição Weibull
Fonte: Reliasoft (2015a)

A Figura 18 demonstra a influência do parâmetro de forma β na curva da taxa de falha $\lambda(t)$. Pode-se notar que:

- 1) para $\beta < 1$ a taxa de falha decresce com o tempo, principalmente de forma mais acentuada nos tempos iniciais, o que caracteriza uma mortalidade precoce, isto é, o sistema apresenta muitas falhas no começo de vida.
- 2) para $\beta = 1$ a taxa de falha é constante e, assim, a curva tem comportamento similar à de uma distribuição exponencial, caracterizando ocorrência de falhas de modo aleatório.
- 3) para $\beta > 1$ a taxa de falha é crescente com o tempo, o que caracteriza que o equipamento apresenta muitas falhas por desgaste decorrente de envelhecimento.

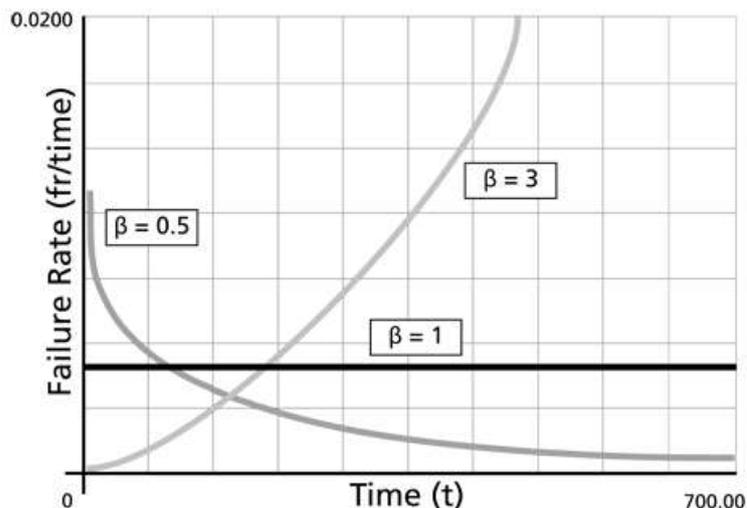


Figura 18 – Efeito da variação de β na taxa de falha λ da distribuição Weibull
Fonte: Reliasoft (2015a)

A influência do parâmetro de escala η , nas curvas *pdf* de uma distribuição Weibull pode ser demonstrada na Figura 19. Da análise do gráfico, pode-se notar que o parâmetro de escala tem um efeito principalmente no eixo das abcissas, ou eixo do tempo. Uma vez que a área abaixo da curva *pdf* é constante e tem valor unitário, a variação de η provoca um alongamento da curva no eixo de tempo, com conseqüente redução do pico e espalhamento dos tempos para falha. Do ponto de vista de confiabilidade, quanto menor valor do parâmetro de escala, mais próximos os tempos para falha estarão da moda. Do contrário, parâmetro de escala mais elevados representam amostras com tempo de falha espalhados por intervalos de tempo maiores resultando, assim, em menor previsibilidade das falhas.

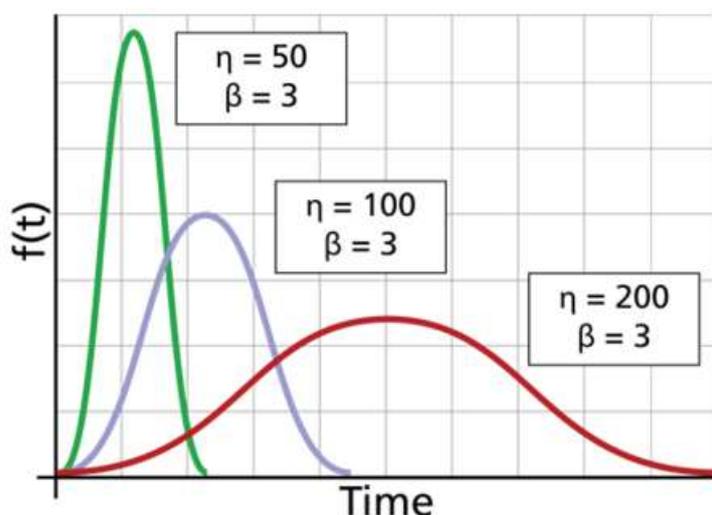


Figura 19 – Efeito da variação de η na curva *pdf* da distribuição Weibull
Fonte: Reliasoft (2015a)

Por fim, a influência do parâmetro de posição γ está representada na Figura 20. Observa-se pelo gráfico, que o parâmetro tem como seu efeito o deslocamento da curva *pdf* ao longo do eixo das abscissas. Quando γ representa um valor positivo, o parâmetro representa um período de tempo no qual não há probabilidade de o elemento falhar.

No entanto, quando γ representa um valor negativo, o elemento pode falhar mesmo antes do início de sua vida operacional. Tal fato pode estar relacionado às condições inadequadas durante a produção, transporte, armazenamento ou teste de comissionamento para operação.

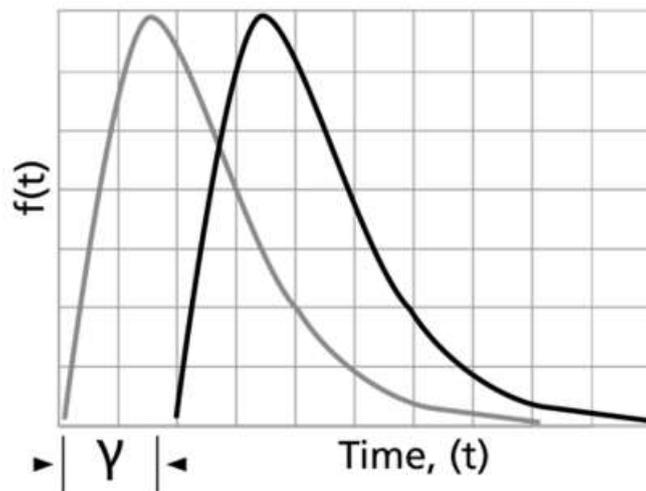


Figura 20 – Efeito da variação de γ na curva *pdf* da distribuição Weibull
Fonte: Reliasoft (2015a)

Para Pallerosi (2006) estes gráficos demonstram a flexibilidade que a Weibull possui.

A escolha por esta curva estatística é comum nas análises em confiabilidade, porque ela é a mais flexível e recomendada para análise de falhas em equipamentos e pode representar falhas crescentes decrescentes ou constantes (RELIASOFT, 2015a).

3.7 DIAGRAMAS DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE

Para representar sistemas, utiliza-se o diagrama de blocos com o objetivo de obter, por meio da relação de funções de confiabilidade entre os diversos componentes, os resultados de todo o sistema.

As configurações de sistemas mais comuns são o sistema série e o paralelo. Na configuração em série, se um dos componentes vier a falhar, todo o sistema tem sua operação comprometida e falha. Um exemplo de equipamento que representa um sistema em série é uma impressora. A Figura 21 ilustra um exemplo de sistema em série puro.



Figura 21 – Exemplo de um sistema em série
Fonte: Autoria Própria

Para que o sistema tenha sucesso na sua operação, todos os subsistemas em série que o compõe também devem ter sucesso e não falhar. Assim, a confiabilidade do sistema é dada por:

$$\begin{aligned}
 R_s &= P(X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_n) \\
 &= P(X_1)P(X_2|X_1)P(X_3|X_1 X_2) \dots P(X_n|X_1 X_2 \dots X_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Onde:

R_s = a confiabilidade do sistema

X_i = o evento da unidade i ser operacional

$P(X_i)$ = a probabilidade da unidade i ser operacional

No caso de os componentes serem estatisticamente independentes, a equação se resume a:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i
 \tag{18}$$

No sistema paralelo, pelo menos uma das unidades deve ser bem-sucedida para o sistema de sucesso. Unidades em paralelo também são referidas como

unidades redundantes. A redundância é um aspecto muito importante para a confiabilidade do projeto em que a adição de redundância é um dos vários métodos de melhorar a confiabilidade do sistema. Exemplos de aplicação incluem os de freio e cabos de apoio em pontes (RELIASOFT, 2015b). A Figura 22 ilustra um exemplo de sistema em paralelo simples.

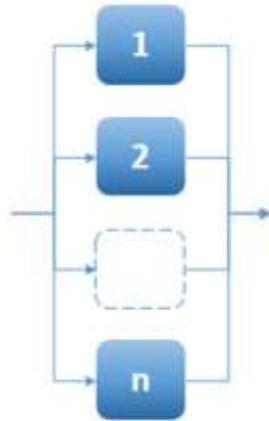


Figura 22 – Exemplo de um sistema em paralelo simples
Fonte: Autoria Própria

Partindo agora da não confiabilidade, temos:

$$\begin{aligned} Q_s &= P(X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_n) \\ &= P(X_1)P(X_2|X_1)P(X_3|X_1 X_2) \dots P(X_n|X_1 X_2 \dots X_{n-1}) \end{aligned} \quad (19)$$

Onde:

Q_s = a não confiabilidade do sistema

X_i = o evento de falha da unidade i

$P(X_i)$ = a probabilidade de falha da unidade i

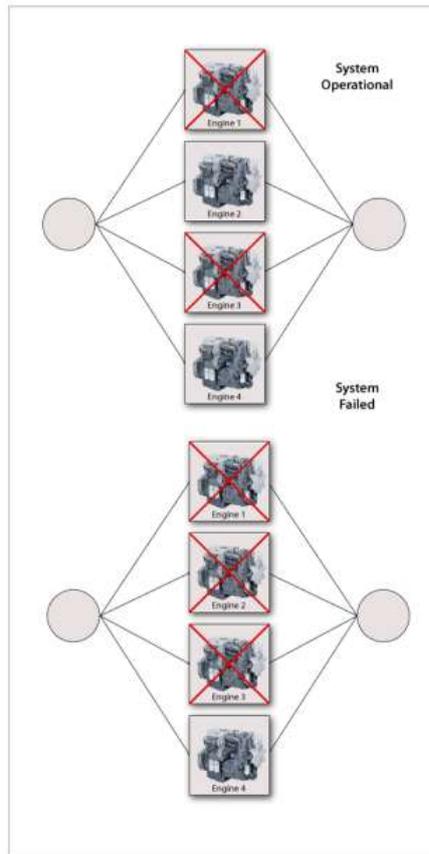
No caso de os componentes serem estatisticamente independentes, a equação se resume a:

$$Q_s = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (20)$$

Nesse sentido, a confiabilidade pode ser expressa por:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (21)$$

Existe ainda um tipo de sistema paralelo que é normalmente chamado de paralelo combinado (k/n). Neste tipo de configuração, sempre existe um ou mais componentes reservas. Como exemplo desse arranjo, pode-se citar uma central de geração de energia que opera com 4 geradores, mas que atenderia a demanda com apenas 2 deles. Esse sistema está representado pela Figura 23.



**Figura 23 – Exemplo de um sistema em paralelo combinado
 Fonte: Reliasoft (2015b).**

A equação matemática que representa a confiabilidade de um sistema paralelo combinado (k/n) é dada por:

$$R_S = \sum_{i=k}^n \left(\frac{n!}{(n-i)!i!} \right) R^i (1-R)^{n-i} \quad (22)$$

3.8 DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE

Na indústria de processo, a grande maioria dos sistemas são sistemas reparáveis, ou seja, precisam passar por tarefas de manutenção para retomar sua função operacional.

Muitos componentes ou sistemas podem ser reparados facilmente outros definitivamente não. Conceitualmente, as características do projeto que lidam com estes aspectos da manutenção são o domínio da manutenibilidade. As características de um projeto incluem acessibilidade das peças para o reparo, normatização de peças, construção modular e desenvolvimento de equipamentos e procedimentos para diagnóstico.

Mantenibilidade refere-se à habilidade de um item, sob determinadas condições de uso, de ser mantido, ou restaurado a um estado em que possa desempenhar sua função desejada, quando a manutenção é realizada sob determinadas condições e usando os recursos e procedimentos prescritos.

É preciso tomar cuidado em se distinguir manutenção e manutenibilidade de um item. A definição da primeira pode ser dada por: conjunto de ações determinadas a conservar ou reinstalar um item em uma situação na qual possa executar sua função solicitada. Já a segunda, é uma característica de projeto a qual determina a facilidade da manutenção, o período de manutenção as funções realizadas pelo item e os custos (LAFRAIA, 2001).

A disponibilidade é um critério de desempenho para sistemas reparáveis que contabiliza tanto a confiabilidade quanto as propriedades de manutenção de um componente ou sistema. É definida como a probabilidade de o sistema estar funcionando adequadamente quando for solicitado para uso. Isto é, a disponibilidade é a probabilidade de que um sistema não esteja falho ou submetido a uma ação de reparo quando ele precisa ser usado (RELIASOFT,2015b).

Durante seu ciclo de vida, um sistema reparável apresenta um tempo de operação descontínuo, caracterizado por uma sequência de alternâncias entre estados funcionais (*Uptime*) e estados de reparo (*Downtime*). Após seu início de vida operacional, em algum momento ele apresentará uma falha, deverá sofrer ações de manutenção para ser reparado e então retornar ao estado operacional. Assim, inicia-se um ciclo de alternância pois, em algum tempo de operação aleatório o sistema novamente falhará, será reparado, e retomará a operação.

Para Reliasoft (2015b), isso é chamado de processo de renovação e é definido como uma sequência de variáveis aleatórias independentes e não-negativas. Neste caso, as variáveis aleatórias são os tempos de falha e os tempos de reparação / restauração. Cada vez que uma unidade falha e é restaurada a funcionar, uma renovação é dito ter ocorrido.



Figura 24 – Processo de renovação de um componente durante seu ciclo de vida
Fonte: Reliasoft, 2015b.

O processo de renovação de um sistema é determinado pelos processos de renovação de seus componentes. Por exemplo, considere um sistema em série de três componentes estatisticamente independentes. Cada componente tem uma distribuição de falhas e uma distribuição de reparo. Como os componentes estão em série, quando um componente falha, todo o sistema falha. O sistema é então para baixo enquanto o componente falhou está em reparação (RELIASOFT,2015b). A Figura 25 seguir ilustra isso.

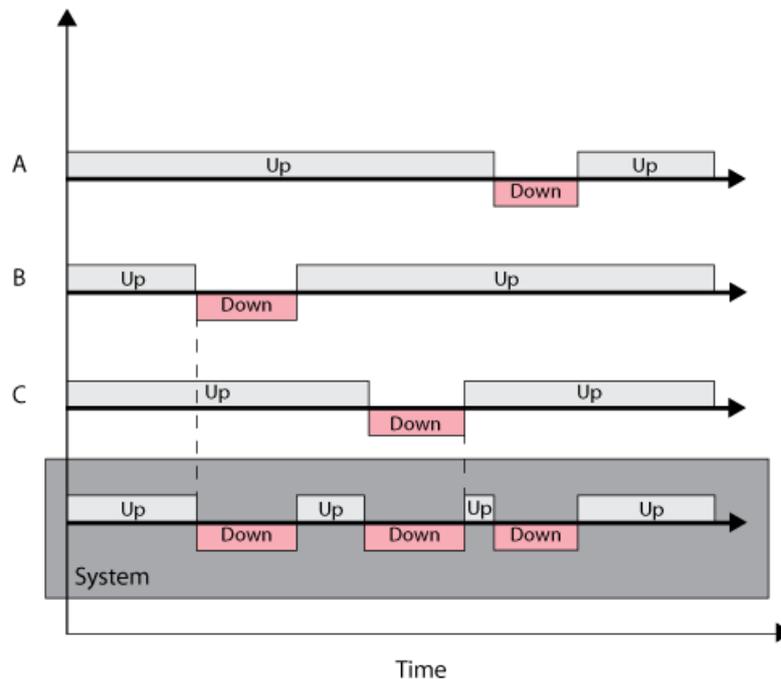


Figura 25 – Processo de renovação de um sistema em série
Fonte: Reliasoft, 2015b.

4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DO SISTEMA

Neste capítulo, aplica-se os conceitos apresentados no capítulo 3, aliados aos softwares *Weibull ++* e *Blocksim*, do pacote *Synthesis* da *Reliasoft*, para construir um modelo computacional que represente o sistema logístico de petróleo apresentado no capítulo 2.

4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS DE VIDA DOS SUBSISTEMAS

Os dados necessários para construção do modelo foram obtidos de 2 fontes:

1). As informações das falhas dos equipamentos relevantes para operação do sistema foram coletadas das ordens de manutenção (OM) corretiva registradas no Sistema de Gestão SAP. Posteriormente, efetuou-se uma segregação das ordens que não ocasionavam parada de equipamento, excluindo-as do conjunto de dados para a simulação.

2). As informações das falhas de operação do sistema, ocasionadas por fatores externos (por exemplo: falta de energia elétrica) ou por fatores operacionais (falta de produto especificado, atraso no descarregamento de navio tanque, troca de turno operacional, etc.) foram obtidas de relatórios informativos de operações de dutos, emitidos pela área de Programação de Oleodutos.

Os equipamentos mais relevantes para operação do sistema estão relacionados na Tabela 1:

Tabela 1 – Equipamentos operacionais do sistema

(continua)

Unidade	Equipamento	Função
São Sebastião (SSE)	BA-3207A	Bomba Auxiliar - Duto OSBAT
	BA-3207B	Bomba Auxiliar - Duto OSBAT
	BA-3207C	Bomba Auxiliar - Duto OSBAT
	B-3208A	Bomba Principal - Duto OSBAT
	B-3208B	Bomba Principal - Duto OSBAT
	B-3208C	Bomba Principal - Duto OSBAT
	B-3208D	Bomba Principal - Duto OSBAT
Estação de Guaratuba (GRT)	B-3404A	Bomba Principal - Duto OSBAT
	B-3404B	Bomba Principal - Duto OSBAT

Tabela 1 – Equipamentos operacionais do sistema

(conclusão)

Unidade	Equipamento	Função
Terminal de Cubatão (CUB)	BA-05A	Bomba Auxiliar - Duto OSSP P
	BA-05B	Bomba Auxiliar - Duto OSSP P
	BP-02	Bomba Principal - Duto OSSP P
	BP-03	Bomba Principal - Duto OSSP P
	BP-05	Bomba Principal - Duto OSSP P
	BP-12	Bomba Principal - Duto OSSP P
	BP-13	Bomba Principal - Duto OSSP P

4.2 SUBDIVISÃO DAS OPERAÇÕES DO SISTEMA

Nosso sistema logístico de petróleo apresenta 1 origem (São Sebastião) e 2 destinos consumidores, representados pelas refinarias (RPBC e RECAP) citadas no capítulo 2.

Dessa forma, a simulação considerará 2 cenários operacionais:

Cenário 1 – Neste cenário, simula-se a operação de São Sebastião abastecendo a refinaria RPBC, desconsiderando assim o terminal de Cubatão, suas bombas e a refinaria RECAP.

Cenário 2 – Neste cenário, simula-se a operação de São Sebastião abastecendo a refinaria RECAP. Neste caso, a refinaria RPBC não tem relevância para o comportamento do sistema, configurando-se apenas como ponto de alinhamento.

A Figura 26 ilustra todos os subsistemas presentes no estudo e sua inter-relações de confiabilidade para operação adequada do sistema. As Figura 27 e Figura 28 representam, de forma geral, como o problema foi subdividido nesses 2 cenários. As caixas delimitam os equipamentos/subsistemas por cada unidade operacional componente do sistema. Os equipamentos/subsistemas em tracejado indicam que esses componentes não foram considerados para determinado cenário.

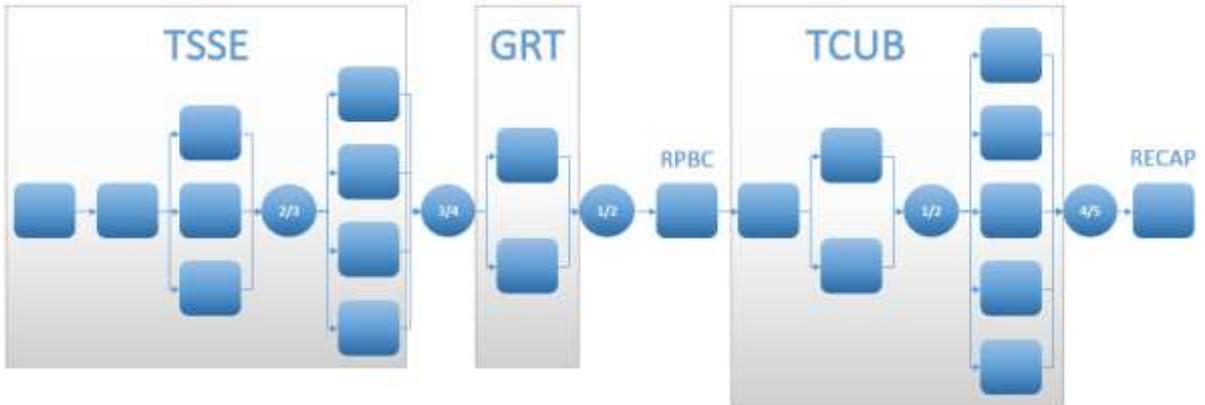


Figura 26 – Representação dos equipamentos/subsistemas do sistema de Petróleo
Fonte: Autoria própria

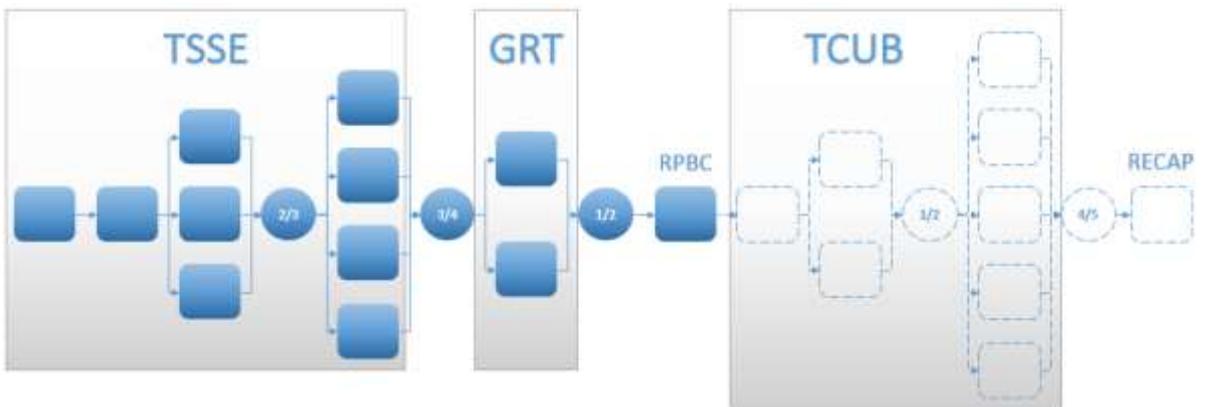


Figura 27 – Cenário 1 – Operação de abastecimento de SSE para RPBC
Fonte: Autoria própria

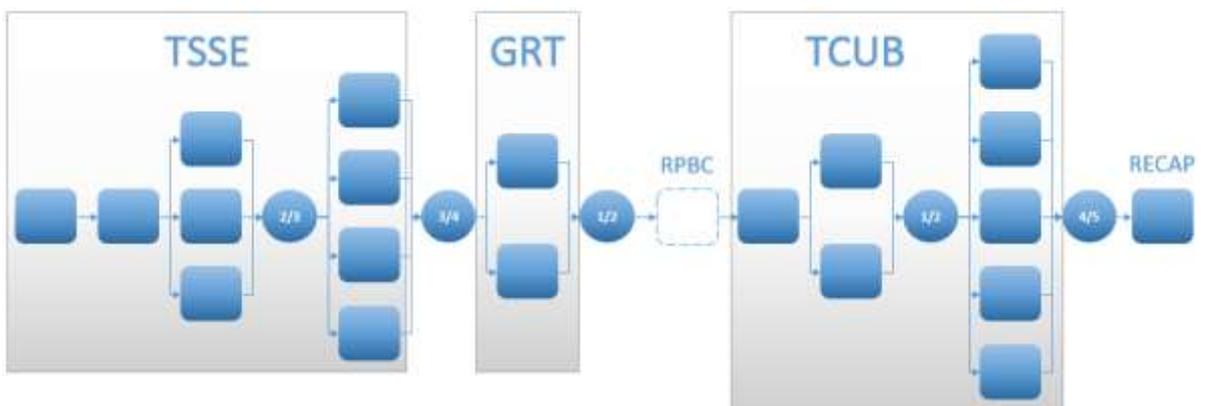


Figura 28 – Cenário 2 – Operação de abastecimento de SSE para RECAP
Fonte: Autoria própria

Nas próximas seções, procede-se o detalhamento de como cada um dos blocos foi configurado para montagem do modelo de simulação estatística.

4.3 MODELOS DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE DOS SUBSISTEMAS

Nesta seção, detalha-se as etapas para obtenção dos modelos de confiabilidade e manutenibilidade dos subsistemas e, posteriormente, procede-se à simulação dos cenários operacionais.

4.3.1 Terminal de São Sebastião – TSSE

A unidade de origem, o terminal de São Sebastião, tem grande influência sobre a parada das operações do sistema de petróleo com relação aos seguintes aspectos:

- Falta de produto nos tanques de armazenamento, que engloba os seguintes motivos: dificuldade de atracação dos navios nos píeres devido mau tempo, falha na operação de descarregamento dos navios para os tanques, produto fora de especificação, atraso na certificação do tanque para expedição, atraso de início da operação por troca de turno;
- Falta de energia elétrica seja por falha da concessionária ou dos sistemas internos da unidade (subestação, transformadores, etc.)

Optou-se por essa segregação das falhas e reparos em 2 subsistemas pois, notadamente, as falhas relacionadas à essa unidade que causaram parada das operações do sistema tem elevada representatividade nos 2 aspectos supracitados.

Portanto, inicia-se a montagem do nosso diagrama de blocos de simulação por 2 blocos de confiabilidade em série no programa *Blocksim*, para a unidade Terminal de São Sebastião (Figura 29).

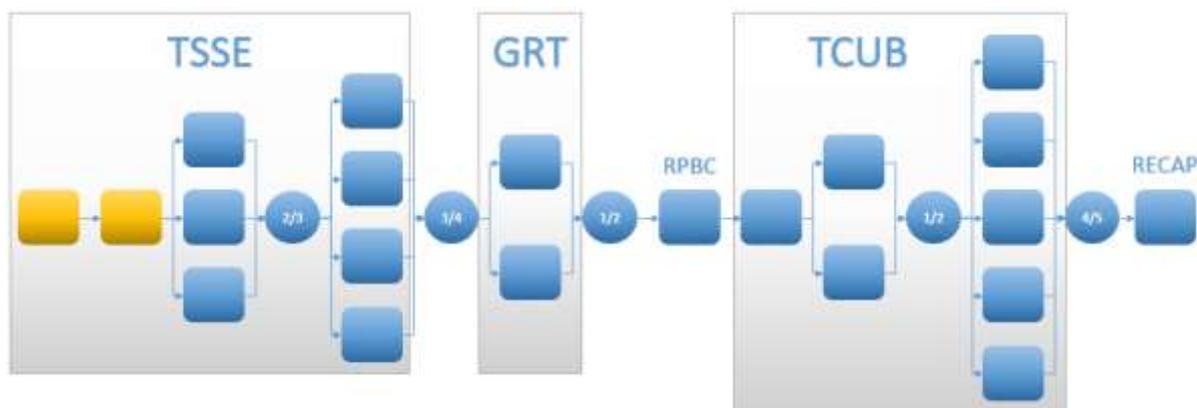


Figura 29 - Subsistemas Elétrico e Operacional de SSE
 Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 2 e Tabela 3 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para cada subsistema.

Tabela 2 - Tempo entre falhas para os subsistemas de São Sebastião

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
	167	266	353	450	476	570	1070	2197
Sistema Elétrico	2210	3634						
Sistema Operacional	14	14	15	15	18	20	24	24
	28	28	31	31	32	35	36	39
	40	46	56	56	60	61	65	72
	78	82	89	95	104	117	126	126
	127	140	146	148	154	159	165	179
	191	202	204	210	212	220	221	230
	236	237	238	266	274	286	346	412
	421	435	449	464	485	528	599	627
631	1014							

Tabela 3 - Tempo de reparo para os subsistemas de São Sebastião

(continua)

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
	1	1	2	3	3	3	3	3
Sistema Elétrico	5	5						

Tabela 3 - Tempo de reparo para os subsistemas de São Sebastião

(conclusão)

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
	Sistema Operacional	2	2	2	2	2	2	2
3		3	3	3	3	3	4	4
4		4	4	4	4	4	5	5
5		5	5	5	6	6	6	6
6		7	7	7	7	7	7	8
8		8	9	9	9	9	10	11
11		11	11	12	13	13	14	15
15		17	19	19	20	22	22	23
29		33						

Inserir-se os dados das Tabela 2 e Tabela 3 no software *Weibull ++*, efetuar-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente).

Tabela 4 - Modelos de Confiabilidade para os subsistemas de SSE

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
Sistema Elétrico	Weibull-2P	$\beta = 1,079464$	$\eta = 1176,698957$
Sistema Operacional	Weibull-2P	$\beta = 1,014996$	$\eta = 190,68262$

Tabela 5 - Modelos de Manutenibilidade para os subsistemas de SSE

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
Sistema Elétrico	Weibull-2P	$\beta = 2,405705$	$\eta = 3,275573$
Sistema Operacional	Lognormal-2P	Med. = 1,885062	DP = 0,737626

4.3.2 Bombas Auxiliares – BA-3207 A/B/C – São Sebastião

O próximo conjunto de equipamentos do nosso sistema refere-se as bombas auxiliares BA - 3207 A/B/C do oleoduto OSBAT, localizadas no terminal de São Sebastião. Seu posicionamento está ilustrado na Figura 30.

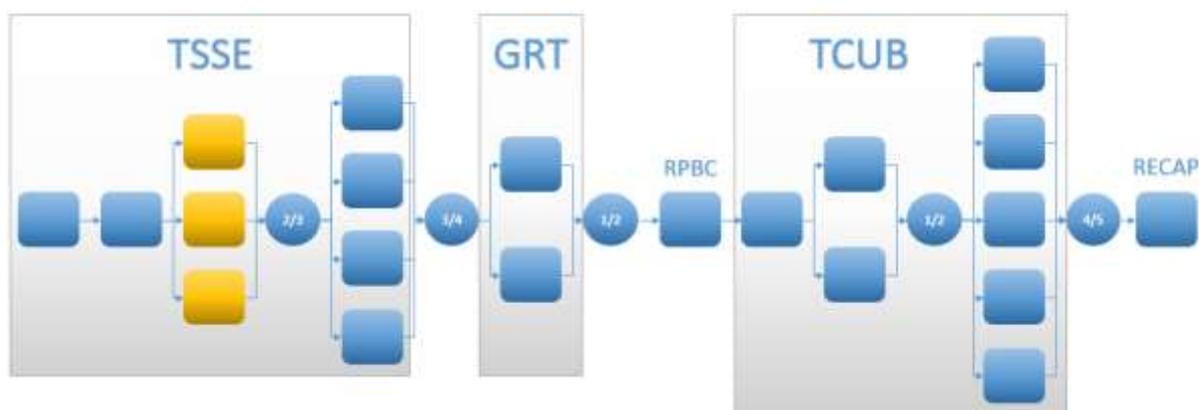


Figura 30 – Subsistema bombas auxiliares BA-3207 A/B/C do OSBAT – SSE
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 6 e Tabela 7 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para cada equipamento.

Tabela 6 – Tempo entre Falhas para as bombas BA-3207 A/B/C

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
	BA-3207A	109	163	203	225	239	330	808
	1296	1509	1845	1913	2428	2446		
BA-3207B	64	92	184	616	784	832	1040	1048
	2056							
BA-3207C	160	380	448	448	520	544	568	592
	716	760	1456	1528	2008	2416	2920	

Tabela 7 - Tempo de Reparo para as bombas BA-3207 A/B/C

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
	BA-3207A	4	4	8	8	8	8	8
	32	56	56	56	80	104		
BA-3207B	8	8	8	8	8	16	32	56
	80							
BA-3207C	4	4	8	8	8	8	8	8
	8	8	56	56	56	56	56	

Inserir-se os dados das Tabela 6 e Tabela 7 no software *Weibull ++*, efetuar-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 8 e Tabela 9).

Tabela 8 - Modelos de Confiabilidade para as BA-3207 A/B/C

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BA-3207A	Weibull-2P	$\beta = 1,136663$	$\eta = 1088,442548$
BA-3207B	Weibull-2P	$\beta = 1,157093$	$\eta = 783,290970$
BA-3207C	Weibull-2P	$\beta = 1,367781$	$\eta = 1135,759747$

Tabela 9 - Modelos de Manutenibilidade para as BA-3207 A/B/C

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BA-3207A	Lognormal-2P	Med. = 2,893614	DP = 1,154372
BA-3207B	Exponencial-1P	Tmed = 24,88889	
BA-3207C	Lognormal-2P	Med. = 2,635659	DP = 1,043794

4.3.3 Bombas principais – B-3208 A/B/C/D – São Sebastião

As bombas principais B-3208 A/B/C/D são os últimos subsistemas dentro da unidade de origem. Sua representação no sistema é mostrada na Figura 31.

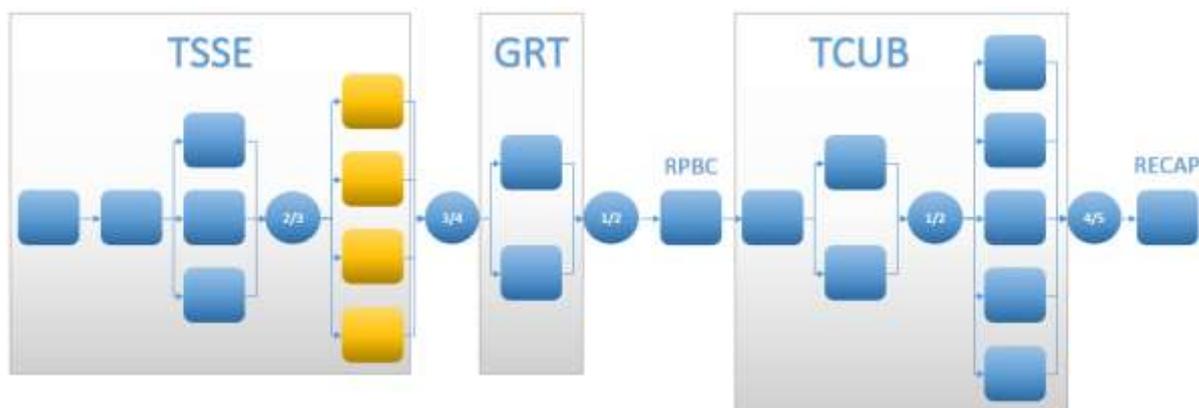


Figura 31 – Subsistema bombas principais B-3208 A/B/C/D do OSBAT – SSE
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 10 e Tabela 11 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para cada equipamento.

Tabela 10 - Tempo entre Falhas para as bombas B-3208 A/B/C/D

(continua)

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
B-3208A	304	352	360	572	644	688	856	908
	928	1264	1312	1464	1580	1628	2348	2848
	3064	3428	3664	4096	4504	5612	5632	5968
B-3208B	88	164	164	164	304	328	404	404
	476	544	572	620	692	716	784	928
	1196	1288	1312	1528	1696	1940	2516	2588
	3064	3212	3952	5008	5372	5516		
B-3208C	188	188	212	236	260	280	284	284
	308	380	496	576	596	640	664	740
	832	956	976	1000	1000	1000	1392	1408
	1504	1676	1816	1844	2392	2392	2660	2680
	2848	2872	3236	3520	3524	3764		

Tabela 10 - Tempo entre Falhas para as bombas B-3208 A/B/C/D

(conclusão)

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
B-3208D	184	208	212	280	308	328	328	332
	376	424	472	544	596	640	668	668
	716	904	1048	1268	1508	1768	1768	1792
	2084	2320	3184	3328	4052	4552		

Tabela 11 - Tempo de Reparo para as bombas B-3208 A/B/C/D

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
B-3208A	4	4	4	4	4	4	4	8
	8	8	8	8	8	8	8	32
	32	32	32	32	80	80	192	288
B-3208B	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4	4
	8	8	8	8	8	8	8	8
	8	32	32	56	56	56		
B-3208C	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	8	8	8	8	8	8	8
	8	8	8	8	8	8	16	32
	32	32	56	56	1080	1104		
B-3208D	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	8	8	8	8	8	8
	8	8	8	8	8	32	32	32
	56	56	56	56	80	80		

Insere-se os dados das Tabela 10 e Tabela 11 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 12 e Tabela 13, respectivamente).

Tabela 12 - Modelos de Confiabilidade para as bombas B-3208 A/B/C/D

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
B-3208A	Weibull-2P	$\beta = 1,262792$	$\eta = 2429,733469$
B-3208B	Weibull-2P	$\beta = 1,006449$	$\eta = 1589,208622$
B-3208C	Weibull-2P	$\beta = 1,233145$	$\eta = 1457,512689$
B-3208D	Weibull-2P	$\beta = 1,114683$	$\eta = 1284,351307$

Tabela 13 - Modelos de Manutenibilidade para as bombas B-3208 A/B/C/D

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
B-3208A	Lognormal-2P	Med. = 2,639699	DP = 1,301911
B-3208B	Lognormal-2P	Med. = 1,996774	DP = 0,884455
B-3208C	Lognormal-2P	Med. = 2,258201	DP = 1,366708
B-3208D	Lognormal-2P	Med. = 2,399982	DP = 1,070572

4.3.4 Estação de Guaratuba - Bombas principais B-3404 A/B

Os próximos subsistemas de bombas são aqueles da estação de Guaratuba, B-3404 A/B, entre o terminal de origem e o destino RPBC. Seu posicionamento na montagem do sistema está na Figura 32.

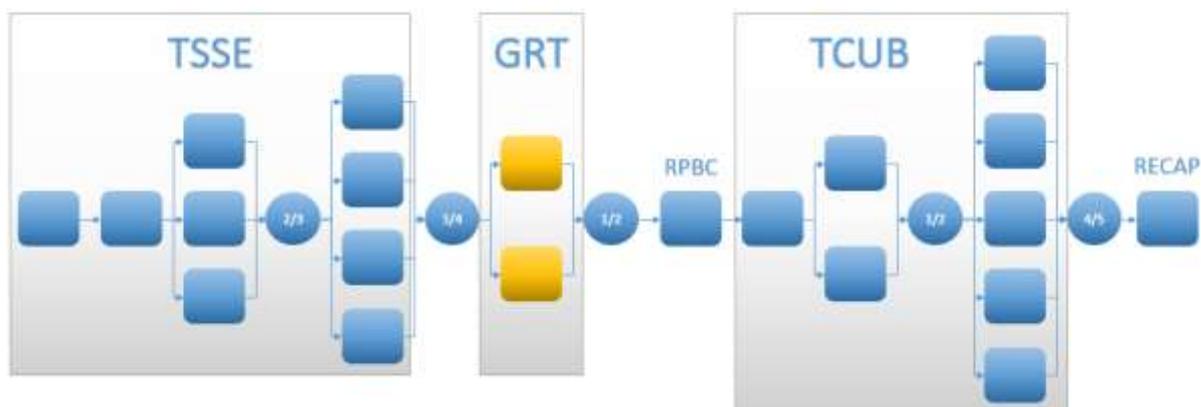


Figura 32 - Subsistema bombas principais B-3404 A/B – Estação de Guaratuba
 Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 14 e Tabela 15 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para cada subsistema.

Tabela 14 - Tempo entre Falhas para as bombas B-3404 A/B

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
	B-3404A	328	688	808	952	1072	1096	1384
2152		2296	2516	2632	2704	2920	2968	3044
3160		3568	5464					
B-3404B	40	112	424	520	664	688	784	1264
	1288	1984	2152	2300	2752	2852	2900	4368
	5536	6760						

Tabela 15 - Tempo de Reparo para as bombas B-3404 A/B

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
	B-3404A	4	4	8	8	8	8	8
32		32	32	32	32	32	32	56
56		80	80					
B-3404B	4	4	8	8	8	8	8	8
	32	32	32	56	56	56	56	80
	104	1080						

Inserese os dados das Tabela 14 e Tabela 15 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 16 e Tabela 17, respectivamente).

Tabela 16 - Modelos de Confiabilidade para as bombas B-3404 A/B

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/Sistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
B-3404A	Weibull-2P	$\beta = 1,866055$	$\eta = 2470,742519$
B-3404B	Weibull-2P	$\beta = 1,041379$	$\eta = 2109,388327$

Tabela 17 - Modelos de Manutenibilidade para as bombas B-3404 A/B

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/Sistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
B-3404A	Weibull-2P	$\beta = 1,21399$	$\eta = 31,030595$
B-3404B	Lognormal-2P	Med. = 3,208833	DP = 1,4319

4.3.5 Refinaria Presidente Bernardes – Falhas Elétricas ou Operacionais

O critério aplicado nesta seção é semelhante ao aplicado para a unidade de origem (São Sebastião):

- Falhas do sistema elétrico impedem que o operador do sistema de transferência possa visualizar as variáveis de controle operacional do duto e dos tanques de recebimento ou efetuar acionamento remoto de válvulas, caso necessário.
- Falhas Operacionais, para o caso da refinaria, geralmente estão associadas à falta de espaço no tanque de recebimento. Quando isso ocorre, o operador de dutos é obrigado a encerrar a operação de forma precoce, o que é considerado uma falha pela programação de oleodutos.

Na Figura 33 é mostrado o posicionamento do subsistema no modelo.

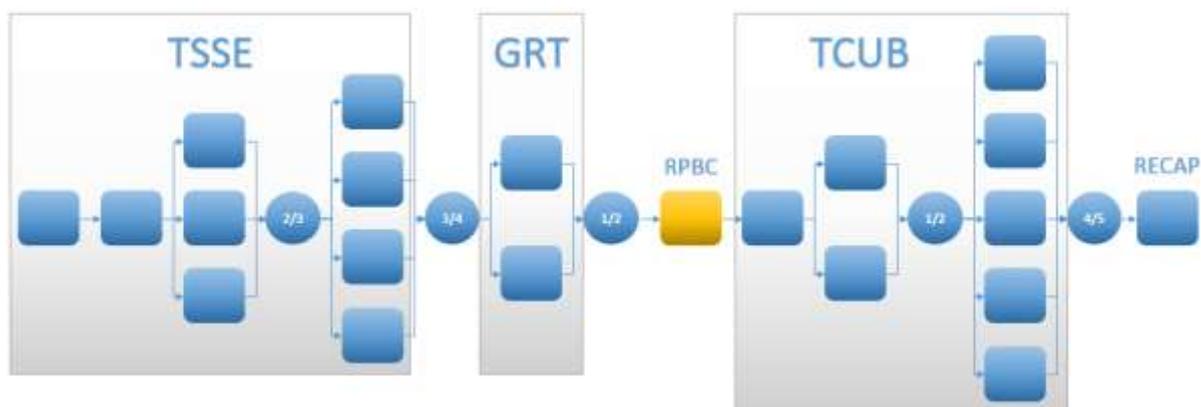


Figura 33 – Subsistema refinaria RPBC
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 18 e Tabela 19 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para o subsistema.

Tabela 18 - Tempo entre Falhas para RPBC

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
RPBC	94	101	213	414	496	593	660	675
	1065	1153						

Tabela 19 - Tempo de Reparo para RPBC

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
RPBC	1	3	4	5	6	6	9	13
	14	16						

Insere-se os dados das Tabela 18 e Tabela 19 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 20 e Tabela 21, respectivamente).

Tabela 20 - Modelos de Confiabilidade para a RPBC

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
RPBC	Weibull-2P	$\beta = 1,554694$	$\eta = 606,449485$

Tabela 21 - Modelos de Mantenabilidade para a RPBC

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
RPBC	Weibull-2P	$\beta = 1,617578$	$\eta = 8,596025$

4.3.6 Terminal de Cubatão – Falhas Elétricas ou Operacionais

O critério aplicado nesta seção é semelhante ao aplicado para as unidades de origem (São Sebastião) e refinaria de Presidente Bernardes (RPBC). As falhas podem impactar tanto as operações de recebimento quanto de expedição.

Na Figura 34 é mostrado o posicionamento do subsistema no modelo.

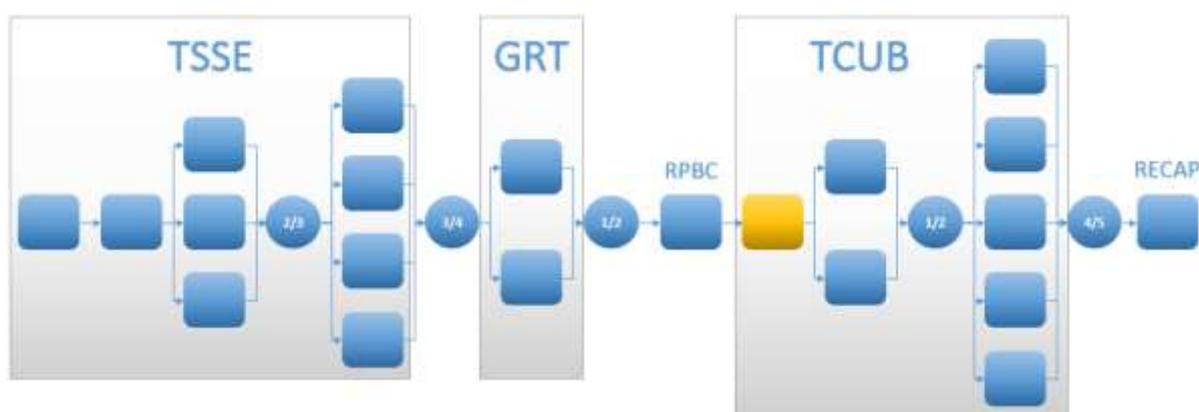


Figura 34 – Subsistema Terminal de Cubatão
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 22 e Tabela 23 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para o subsistema.

Tabela 22 - Tempo entre Falhas para Terminal de Cubatão

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
TCUB	14	36	40	45	258	287	363	371
	399	472	555	610	672	685	692	732
	786	884	932	1567	1799			

Tabela 23 - Tempo de Reparo para Terminal de Cubatão

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
TCUB	1	1	1	1	2	2	2	2
	2	3	3	3	5	5	6	6
	7	7	8	9	19			

Insere-se os dados das Tabela 22 e Tabela 23 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 24 e Tabela 25, respectivamente).

Tabela 24 - Modelos de Confiabilidade para a TCUB

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
TCUB	Weibull-2P	$\beta = 1,144506$	$\eta = 606,133162$

Tabela 25 - Modelos de Manutenibilidade para a TCUB

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
TCUB	Lognormal-2P	Med. = 1,17509	DP = 0,837307

4.3.7 Bombas auxiliares BA-05 A/B – Terminal de Cubatão

As bombas auxiliares do sistema de expedição para o duto OSSP P representam o único conjunto da análise que não têm equipamento reserva. Foram encontrados poucos registros de ordens de manutenção corretiva no SAP.

Na Figura 35 é mostrado o posicionamento do subsistema no modelo.

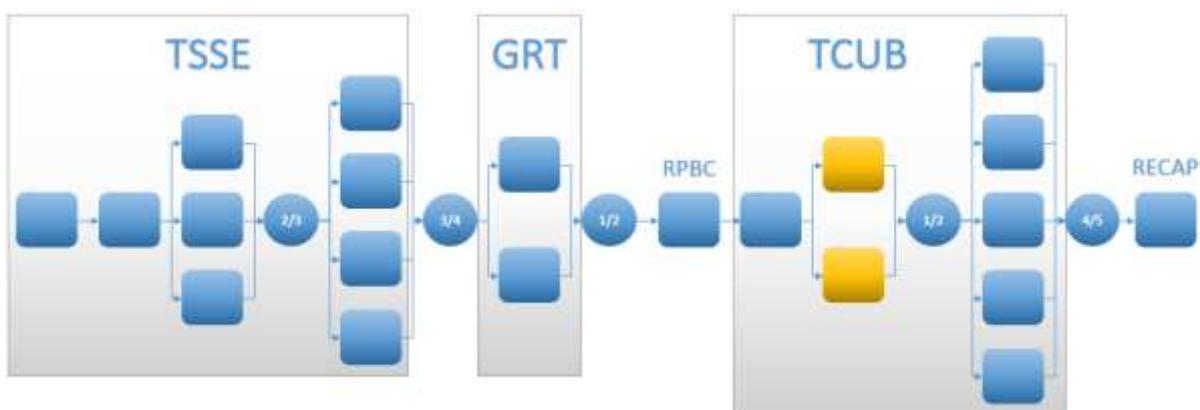


Figura 35 – Subsistema bombas auxiliares BA-05 A/B do terminal de Cubatão
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 26 e Tabela 27 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para o subsistema.

Tabela 26 - Tempo entre Falhas para bombas auxiliares BA-05 A/B

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)			
BA-05A	620	2008	8032	9472
BA-05B	1600	3568	4676	5704

Tabela 27 - Tempo de Reparo para bombas auxiliares BA-05 A/B

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)			
BA-05A	4	8	8	32
BA-05B	4	8	8	32

Inserem-se os dados das Tabela 26 e Tabela 27 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 28 e Tabela 29, respectivamente).

Tabela 28 – Modelos de Confiabilidade para bombas auxiliares BA-05 A/B

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BA-05A	Weibull-2P	$\beta = 1,161258$	$\eta = 5288,453722$
BA-05B	Weibull-2P	$\beta = 2,919789$	$\eta = 4370,628796$

Tabela 29 – Modelos de Manutenibilidade para bombas auxiliares BA-05 A/B

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BA-05A	Lognormal-2P	Med. = 2,252728	DP = 0,872191
BA-05B	Lognormal-2P	Med. = 2,252728	DP = 0,872191

4.3.8 Bombas alternativas principais – BP 02/03/05/12/13 - Terminal de Cubatão

As 5 bombas alternativas trabalham, majoritariamente, em regime de 4 bombas ativas e 1 bomba reserva para atender a demanda de petróleo da refinaria RECAP, por meio do oleoduto OSSP P.

Na Figura 36 é mostrado o posicionamento do subsistema bombas alternativas principais do terminal de Cubatão no modelo.

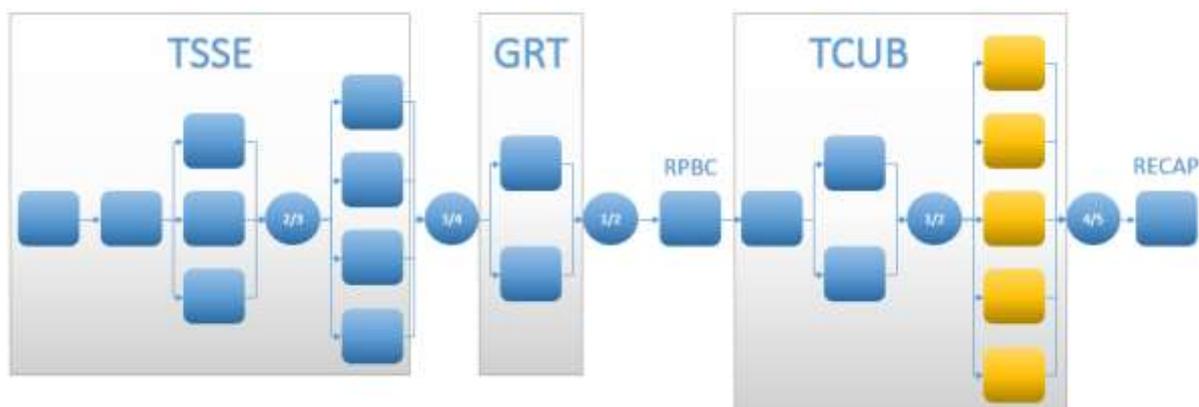


Figura 36 – Subsistemas - bombas principais BP-02/03/05/12/13 do terminal de Cubatão
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 30 e Tabela 31 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para as bombas principais de Cubatão.

Tabela 30 – Tempo entre Falhas das bombas principais BP-02/03/05/12/13

(continua)

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
BP-02	68	88	116	184	212	352	472	472
	496	500	520	592	692	712	716	928
	932	952	980	1096	1168	1220	1240	1288
	1388	1416	1984	2444	2924	3020	3644	
BP-03	112	184	260	304	432	448	476	480
	496	544	592	688	716	740	832	952
	1000	1072	1100	1336	1360	1388	1508	1652
	1720	2056	2152	3712				
BP-05	16	68	88	236	308	328	376	544
	616	624	640	644	688	688	720	760
	808	928	984	1048	1120	1456	1504	1652
	1676	1768	1816	2008	2056	2176	2248	2880
	2992	3624						
BP-12	40	88	112	160	164	280	304	332
	456	472	520	528	592	644	712	836
	908	956	980	1052	1072	1120	1144	1288
	1336	1432	1552	1560	1960	1964	1990	2256
	2368	3640	4536					

Tabela 30 – Tempo entre Falhas das bombas principais BP-02/03/05/12/13

(conclusão)

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
BP-13	16	160	232	256	284	304	352	360
	472	496	520	520	544	620	640	640
	668	760	812	952	952	1024	1096	1144
	1192	1216	1216	1220	1240	1336	1408	1412
	1504	1556	1744	1744	1768	1912	2012	2324
	4264							

Tabela 31 - Tempo de Reparo das bombas principais BP-02/03/05/12/13

(continua)

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
BP-02	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4	4	8	8
	8	8	8	32	32	32	56	56
	56	56	80	80	80	104	120	
BP-03	4	4	4	4	4	4	4	8
	8	8	8	8	8	8	8	8
	8	8	8	32	32	32	56	80
	80	120	120	144				
BP-05	4	4	4	4	4	4	8	8
	8	8	8	8	8	8	8	8
	8	8	8	32	32	32	32	32
	56	56	56	80	80	120	144	144
	168	192						
BP-12	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	8	8	8	8	8	8	8
	8	8	8	8	32	32	32	32
	32	32	32	32	56	80	120	120
	144	144	168					

Tabela 31 - Tempo de Reparo das bombas principais BP-02/03/05/12/13

(conclusão)

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
BP-13	4	4	4	4	4	4	4	4
	8	8	8	8	8	8	8	8
	8	8	8	8	8	8	8	8
	28	32	32	32	32	32	32	56
	56	80	80	104	104	144	152	152
	152							

Inserir-se os dados das Tabela 30 e Tabela 31 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 32 e Tabela 33).

Tabela 32 – Modelos de Confiabilidade das bombas principais BP-02/03/05/12/13

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BP-02	Weibull-2P	$\beta = 1,231556$	$\eta = 1134,833818$
BP-03	Weibull-2P	$\beta = 1,438618$	$\eta = 1120,217554$
BP-05	Weibull-2P	$\beta = 1,260307$	$\eta = 1262,665787$
BP-12	Weibull-2P	$\beta = 1,178167$	$\eta = 1190,446205$
BP-13	Weibull-2P	$\beta = 1,424313$	$\eta = 1149,961592$

Tabela 33 – Modelos de Manutenibilidade das bombas principais BP-02/03/05/12/13

(continua)

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BP-02	Lognormal-2P	Med. = 2,544578	DP = 1,300632

Tabela 33 – Modelos de Manutenibilidade das bombas principais BP-02/03/05/12/13

(conclusão)

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
BP-03	Lognormal-2P	Med. = 2,585313	DP = 1,207613
BP-05	Lognormal-2P	Med. = 2,90082	DP = 1,290148
BP-12	Lognormal-2P	Med. = 2,746353	DP = 1,258673
BP-13	Lognormal-2P	Med. = 2,795928	DP = 1,240914

4.3.9 Refinaria de Capuava - RECAP

O critério aplicado nesta seção é semelhante ao aplicado para as unidades tratadas nas seções 4.3.1 (SSE), 4.3.5 (RPBC) e 4.3.6. (TCUB). As falhas elétricas e operacionais podem impactar tanto as operações de recebimento.

Na Figura 37 é mostrado o posicionamento do subsistema no modelo.

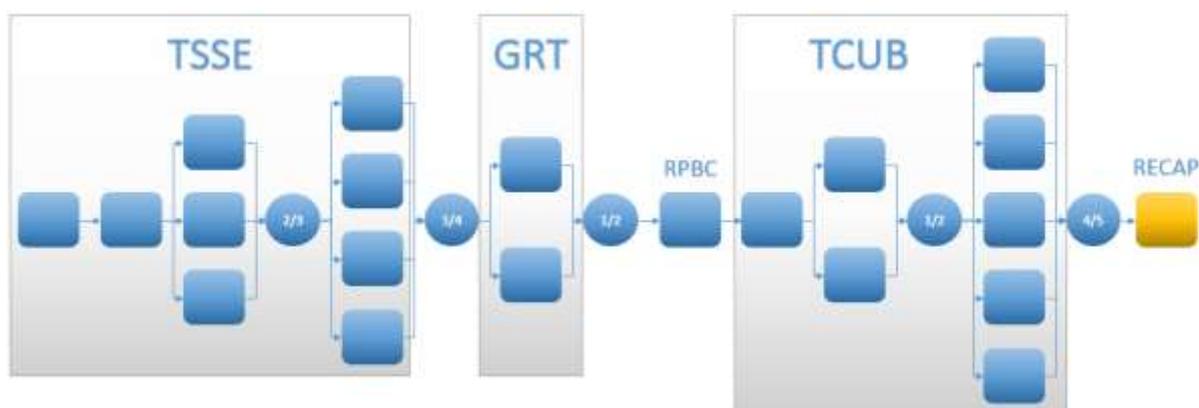


Figura 37 – Subsistema Refinaria de Capuava - RECAP
Fonte: Autoria Própria

Relaciona-se nas Tabela 34 e Tabela 35 os tempos entre falhas e tempo de reparo obtidos para o subsistema RECAP.

Tabela 34 – Tempo entre Falhas para a RECAP

Equipamento/ Subsistema	Tempo entre Falhas (Horas)							
RECAP	193	239	271	437	652	846	2054	2207

Tabela 35 – Tempo de Reparo para a RECAP

Equipamento/ Subsistema	Tempo de Reparo (Horas)							
RECAP	1	1	2	2	4	4	10	144

Insere-se os dados das Tabela 34 e Tabela 35 no software *Weibull ++*, efetua-se o teste de aderência e se obtém as distribuições de confiabilidade e manutenibilidade para os subsistemas (Tabela 36 e Tabela 37, respectivamente).

Tabela 36 - Modelos de Confiabilidade para RECAP

MODELO DE CONFIABILIDADE – R(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
RECAP	Weibull-2P	$\beta = 1,184147$	$\eta = 918,721039$

Tabela 37 - Modelos de Manutenibilidade para RECAP

MODELO DE MANTENABILIDADE – M(t)			
Equipamento/ Subsistema	Distribuição	Parâmetro 1	Parâmetro 2
RECAP	Lognormal-2P	Med. = 1,42891	DP = 1,624421

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

No capítulo anterior, foram obtidos os modelos de confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos componentes do sistema de petróleo, a partir dos dados históricos das paradas operacionais e das ordens de manutenção registradas no sistema de gestão da manutenção (SAP).

Com os modelos prontos, pode-se efetuar simulações dos cenários operacionais possíveis e determinar a disponibilidade, confiabilidade, número de falhas esperadas para o sistema, MTBF, tempo disponível/indisponível, conhecer a influência de cada equipamento na disponibilidade do sistema geral, etc.

Utilizar-se-á o software *Blocksim*, do pacote *Synthesis* da *Reliasoft*, para apoiar nesse processo de simulação dinâmica.

5.1 CENÁRIO 1 – SÃO SEBASTIÃO ABASTECE RPBC

O cenário 1 já foi apresentado previamente e, para fins de recordação, novamente é destacado na Figura 38.

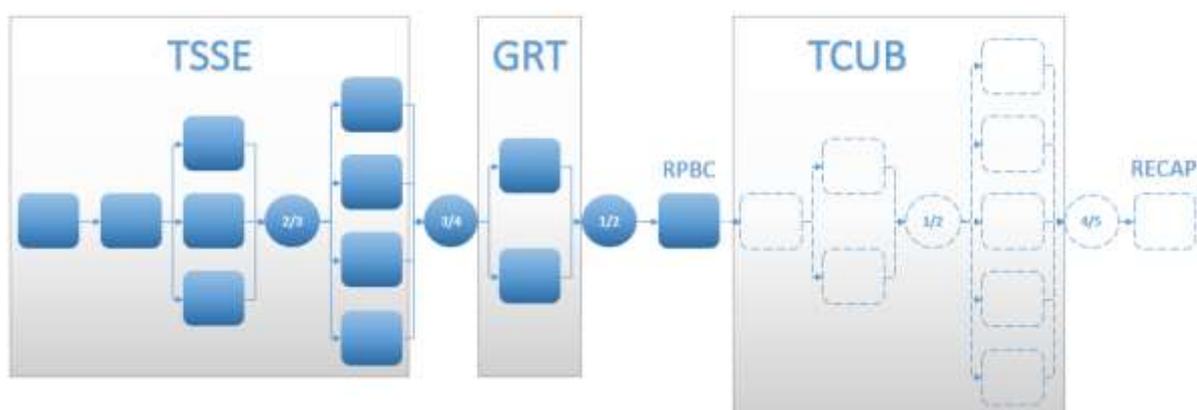


Figura 38 – Representação dos subsistemas contemplados no cenário 1
 Fonte: Autoria Própria

A aplicação dos modelos de confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos foi efetuada no diagrama de blocos da Figura 39.

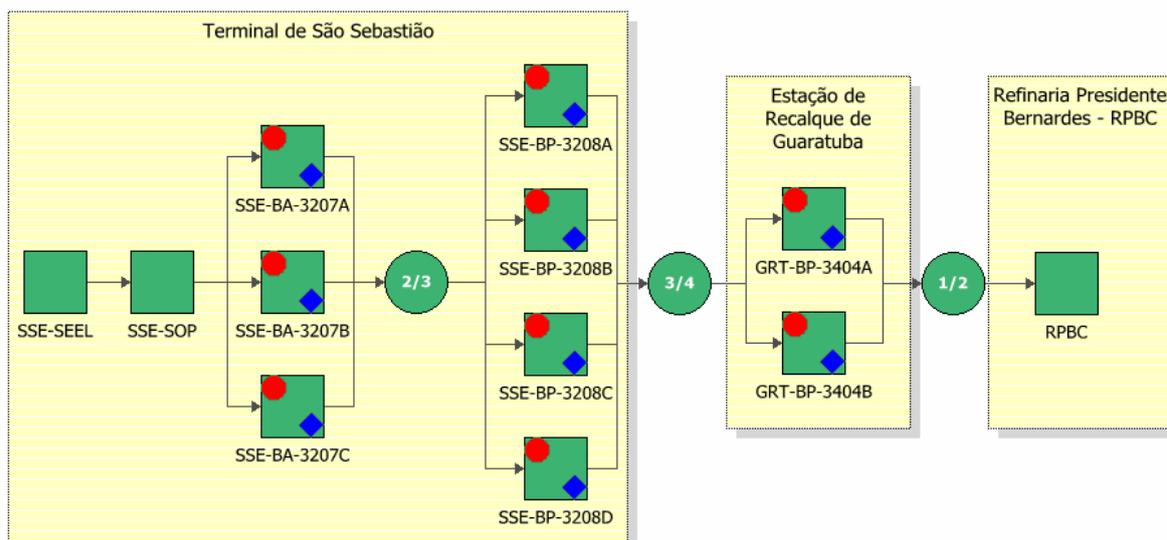


Figura 39 – Montagem do diagrama de blocos do cenário 1 no *Blocksim*
Fonte: Autoria própria

Os blocos “SSE-SEEL” e “SSE-SOP” representam, respectivamente, o sistema elétrico (falhas por queda de energia elétrica) e sistema operacional (falhas operacionais) e foram representados em série pois a falha de qualquer um deles causa a parada total do sistema.

A seguir, dispõe-se um conjunto de blocos em paralelo das bombas auxiliares (BA-3207 A/B/C), das quais são necessárias 2-de-3 operacionais para que o sistema opere sem restrições.

Após as bombas auxiliares, montou-se um conjunto paralelo de bombas principais de São Sebastião (B-3208 A/B/C/D) das quais 3 devem operar simultaneamente para operação plena e 1 bomba ficam em reserva.

Na sequência, há o conjunto paralelo de bombas principais B-3404 A/B de Guaratuba que operam no regime 1-de-2 para operação sem restrições do duto.

Por fim, a unidade receptora da RPBC, cujas falhas durante o recebimento de produto podem interromper todo o sistema.

Os losangos azuis nos blocos indicam que eles foram configurados no esquema de *stand-by rotation*, ou seja, caso um dos blocos ativos em paralelo venha a falhar, o bloco configurado inicialmente como reserva é ativado, e o bloco que falhou, após retorno de reparo, fica como reserva no lugar do outro.

5.1.1 Resultados do Cenário 1

Efetuuou-se os cálculos do cenário 1 com 30.000 simulações e a visão geral do resultado está disposta no quadro da Figura 40.

Visão Geral do Sistema	
Geral	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,935548
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,016158
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,940326
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 8760:	0,935567
Confiabilidade(8760):	0
Quantidade Esperada de Falhas:	66,424233
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	7,043994
TMAPF (h):	141,810554
MTBF (Tempo Total) (h):	131,87958
MTBF (Tempo de Funcionamento) (h):	123,379705
MTBE (Tempo Total) (h):	130,61403
MTBE (Tempo de Funcionamento) (h):	122,195722
Tempo Disponível/Indisponível do Sistema	
Tempo Disponível (h):	8195,40232
Tempo Indisponível da MC (h):	522,748189
Tempo Indisponível Total (h):	564,597684
Eventos com Parada do Sistema	
Número de Falhas:	66,366433
Quantidade de MCs:	66,366433
Quantidade de Eventos OFF por Gatilho:	0,7014
Total de Eventos:	67,067833

Figura 40 – Visão Geral do Sistema no cenário 1

O resumo individual dos resultados dos blocos é representado na Figura 41.

Resumo Individual do Bloco											
Nome do Bloco	RS FCI	RS DECI	RS DTICI	Disp. Média (Todos Eventos)	Disp. Média (sem MP, OC e IP)	# Esperado Falhas	Eventos de Parada do Sistema	Tempo Indisponível do Bloco (h)	Tempo Disponível do Bloco (h)	Quantidade de MCs	Tempo Indisponível da MC (h)
GRT-BP-3404A	0,02%	0,02%	0,51%	0,5972	0,9932	2,062	0,012	3528,720	5231,280	2,062	59,767
SSE-BA-3207A	0,32%	0,45%	1,05%	0,7149	0,9779	5,579	0,301	2497,502	6262,498	5,579	193,212
SSE-BA-3207B	0,45%	0,69%	2,52%	0,6015	0,9813	6,587	0,465	3490,749	5269,251	6,587	163,725
SSE-BA-3207C	0,32%	0,49%	1,59%	0,6803	0,9856	5,232	0,327	2800,866	5959,134	5,232	125,938
SSE-BP-3208A	0,12%	0,17%	0,55%	0,8438	0,9892	2,914	0,114	1368,509	7391,491	2,914	94,686
SSE-BP-3208B	0,23%	0,37%	1,39%	0,7673	0,9951	3,969	0,251	2038,402	6721,598	3,969	43,287
SSE-BP-3208C	0,18%	0,27%	0,86%	0,7351	0,9880	4,319	0,180	2320,519	6439,481	4,319	104,795
SSE-BP-3208D	0,23%	0,35%	1,50%	0,6510	0,9905	4,274	0,234	3056,866	5703,134	4,274	82,996
GRT-BP-3404B	0,05%	0,05%	0,10%	0,4024	0,9881	1,577	0,032	5234,727	3525,273	1,577	104,157
RPBC	22,24%	22,03%	20,14%	0,9870	0,9870	14,810	14,773	113,999	8646,001	14,810	113,999
SSE-SEEL	10,71%	10,61%	3,66%	0,9976	0,9976	7,133	7,114	20,705	8739,295	7,133	20,705
SSE-SOP	65,13%	64,51%	66,14%	0,9572	0,9572	43,398	43,265	374,570	8385,430	43,398	374,570

Figura 41 – Resumo individual dos blocos no cenário 1

O Gráfico 1 mostra a Disponibilidade e a Confiabilidade do sistema no tempo. Conforme quadro da Figura 40, pode-se constatar que a confiabilidade do sistema é baixa, pois o MTBF é pouco superior a 131 horas. Ou seja, apesar do sistema como um todo ter uma disponibilidade acima de 93%, o número de falhas que ocorre é elevado, considerado que ocorre uma a cada 5 dias e 10 horas em média.

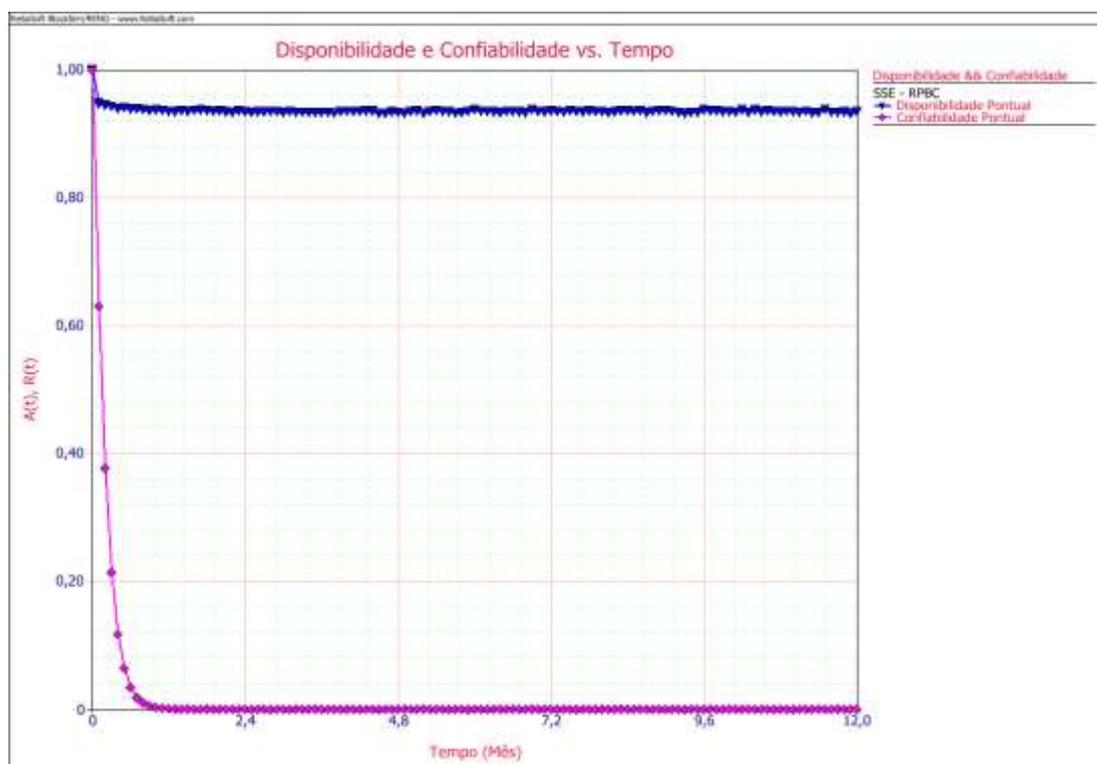


Gráfico 1 - Disponibilidade e Confiabilidade do sistema no cenário 1
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 2 demonstra os estados disponível e indisponível dos blocos e do sistema ao longo do período de 12 meses. Nesse gráfico, observa-se a influência mais significativa dos subsistemas operacional (SSE-SOP) e RPBC, mesmo que qualitativamente. A influência quantitativa será apresentada nos Gráfico 5 e Gráfico 6. Pelo gráfico, também pode-se observar os tempos de aguardo dos equipamentos em estado reserva, que influenciarão a disponibilidade desses blocos.

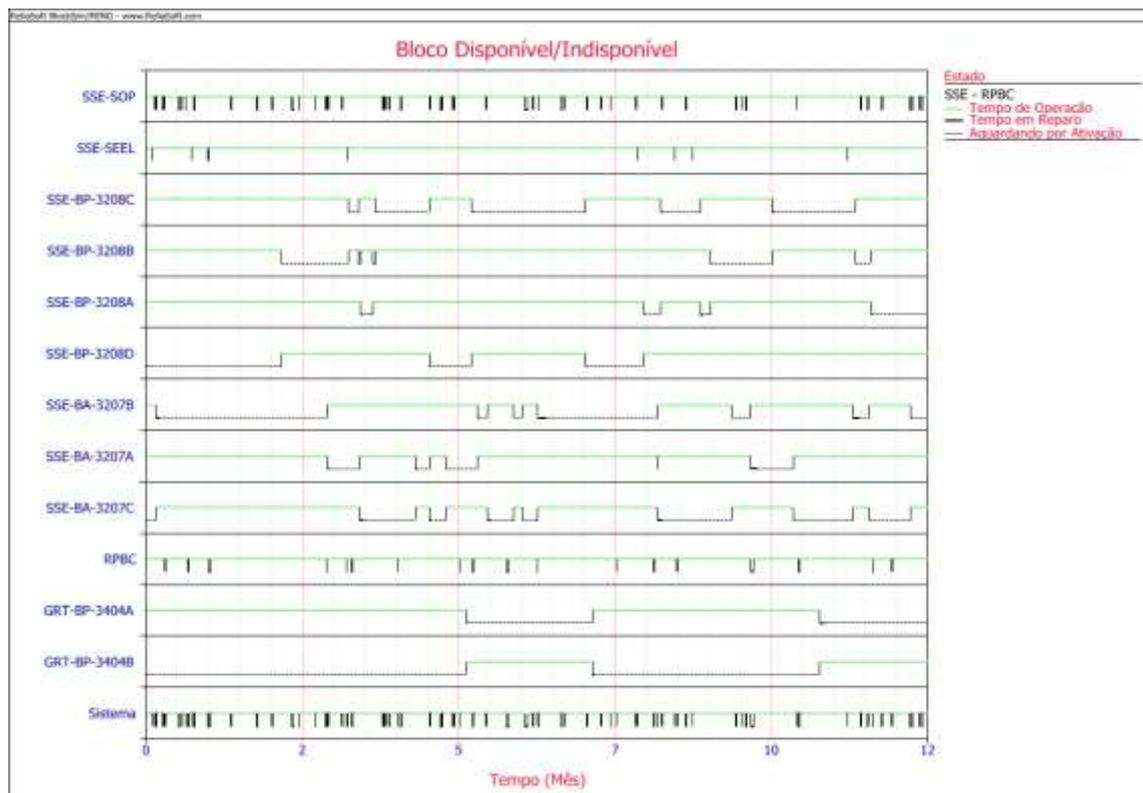


Gráfico 2 - Estado Disponível/Indisponível para os subsistemas no cenário 1
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 3 relaciona a disponibilidade de cada bloco. Apesar dos resultados quantitativos dos blocos das bombas auxiliares e principais estar abaixo de 85%, eles contabilizam os tempos que o equipamento ficou em estado de reserva, mascarando assim o valor verdadeiro. A escala de cor representa a porcentagem de vezes que um evento de indisponibilidade do bloco causou uma indisponibilidade do sistema, corroborando com a análise qualitativa efetuada a partir do Gráfico 2.

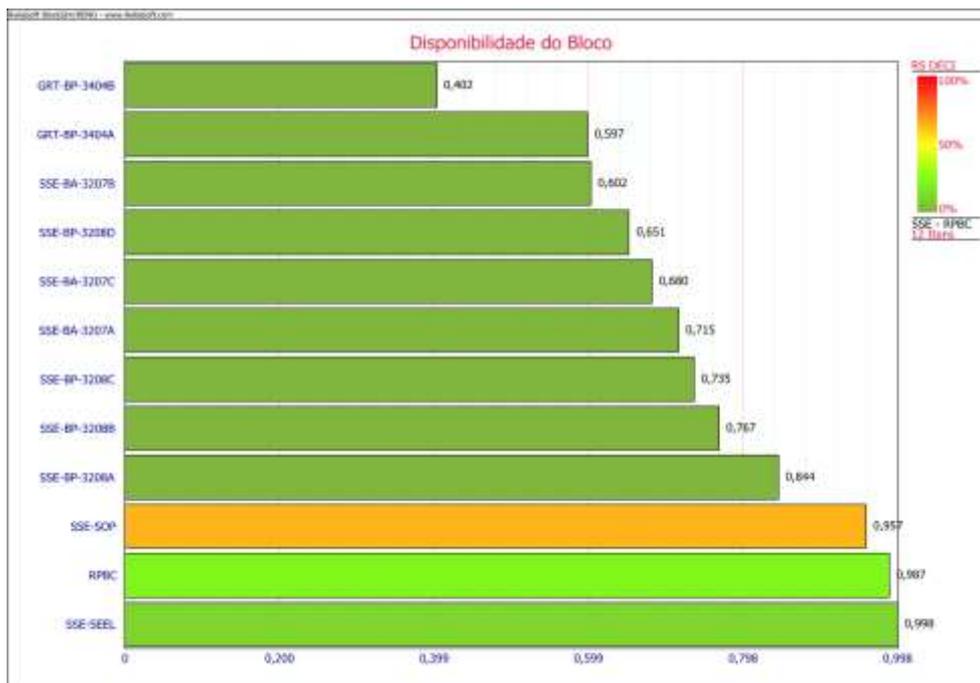


Gráfico 3 - Disponibilidade dos subsistemas no cenário 1
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 4 relaciona o número de falhas esperados no período de 12 meses para cada subsistema. A escala de cor indica a influência maior dos subsistemas SSE-SOP, RPBC e SSE-SEL no número de paradas operacionais do sistema por falha desses blocos. O Gráfico 5 complementa o Gráfico 4 com a quantificação dessa contribuição nas paradas.



Gráfico 4 - Falhas esperadas para os subsistemas no cenário 1
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 5 representa o RS FCI – Índice de Criticidade de Falha *Reliasoft* – índice relativo que mostra o percentual de vezes que uma falha do bloco causou uma falha do sistema. É relacionado à todas as falhas, e não apenas àquelas que causaram indisponibilidade do sistema.

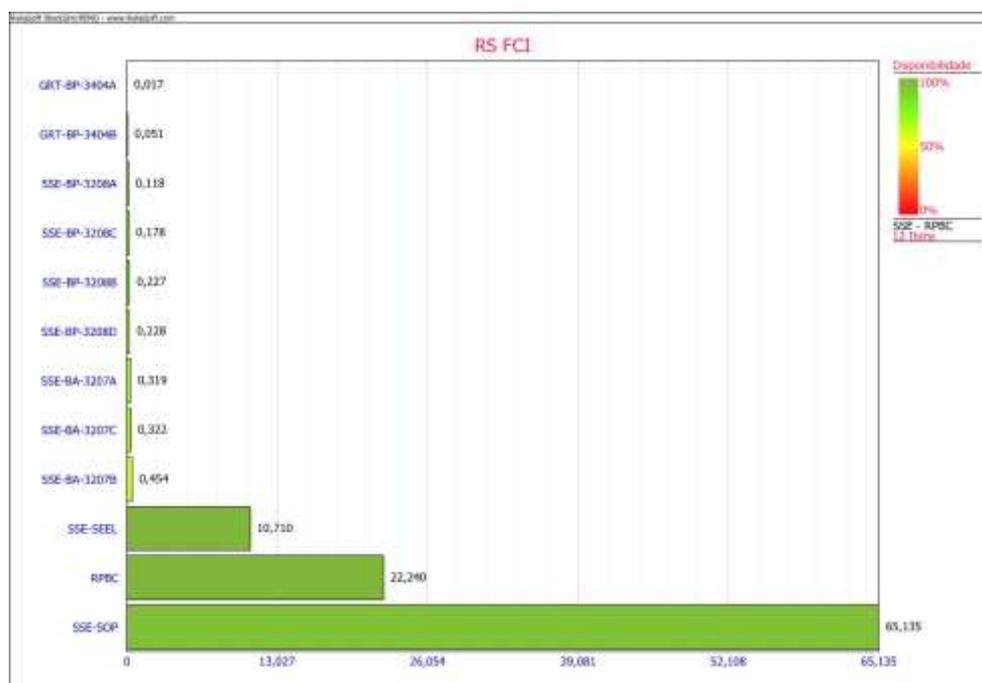


Gráfico 5 – Índice de Criticidade de Falha *Reliasoft* para o cenário 1
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 6 representa o RS DTCL – Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema *Reliasoft* – índice relativo que mostra a contribuição de cada bloco no tempo indisponível do sistema. A escala de cor representa a disponibilidade individual do bloco.

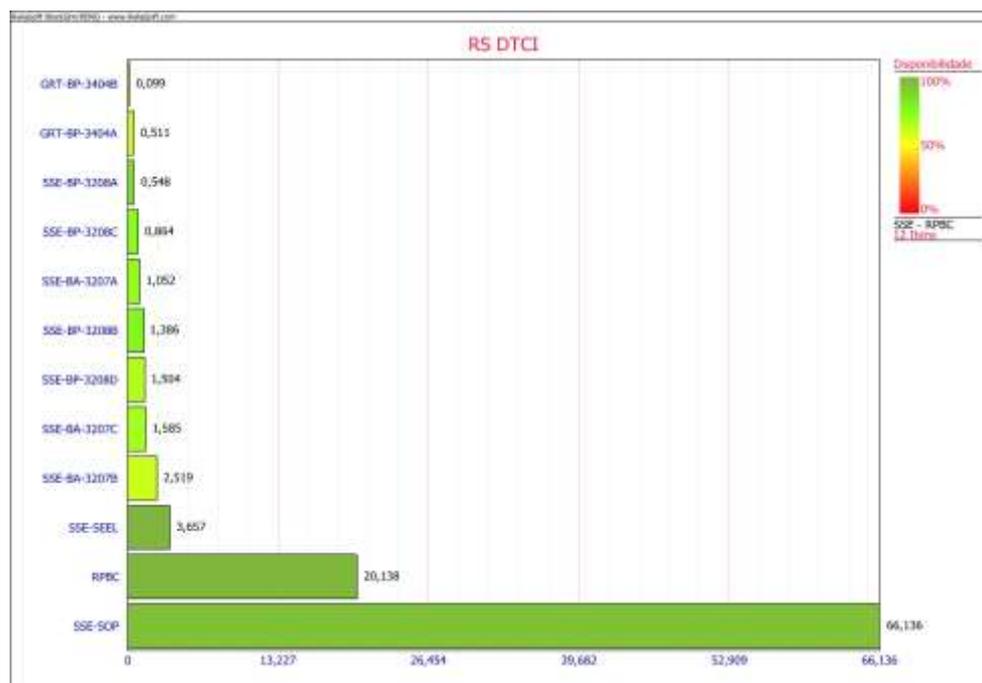


Gráfico 6 – Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema *Reliasoft* para o cenário 1
Fonte: Autoria própria

5.1.2 Interpretação dos resultados do cenário 1

A simulação dinâmica do sistema logístico reparável de abastecimento de petróleo da refinaria RPBC pelo terminal de São Sebastião para um período de 8760 horas (1 ano) apresentou como resultado uma disponibilidade média elevada (93,55%). O tempo indisponível total resultante foi de 564,59 horas, com um número de 67 falhas com parada do sistema e MTBF total de 131,88 horas.

A análise dos Gráfico 2 a Gráfico 6 permite inferir que os blocos mais críticos que causam indisponibilidade no sistema são, na ordem decrescente: SSE-SOP, RPBC e SSE-SEEL. Apesar do curto período de reestabelecimento das operações, o número de falhas apresentado no período é significativamente superior ao mesmo parâmetro apresentado pelos demais blocos.

Os subsistemas de bombas auxiliares e principais de São Sebastião e principais da Estação de Guaratuba, por serem compostos de equipamentos em paralelo, conseguem assimilar razoavelmente a falha de um dos equipamentos com a entrada em operação do equipamento reserva, como pode ser observado nos tempos de aguardo do Gráfico 2. Esse tempo de aguardo teve reflexos também na disponibilidade de blocos apresentada no Gráfico 3.

Os Gráfico 5 e Gráfico 6 são extremamente interessantes do ponto de vista de análise global do sistema pois, enquanto os Gráfico 3 e Gráfico 4 tem foco em aspectos de confiabilidade apenas dos blocos, esses representam o percentual de vezes que uma falha do bloco causou uma falha do sistema (RS FCI) e a contribuição de cada bloco no tempo indisponível do sistema (RS DTCI), respectivamente.

A conclusão da análise do cenário 1 é de que SSE-SOP e RPBC respondem juntos por mais de 85% do tempo indisponível do sistema logístico, enquanto as bombas auxiliares e principais têm representatividade secundária na indisponibilidade do sistema.

5.2 CENÁRIO 2 – SÃO SEBASTIÃO ABASTECE RECAP

O cenário 2 foi apresentado previamente no capítulo 4, entretanto, para fins de recordação, é ilustrado na Figura 42.

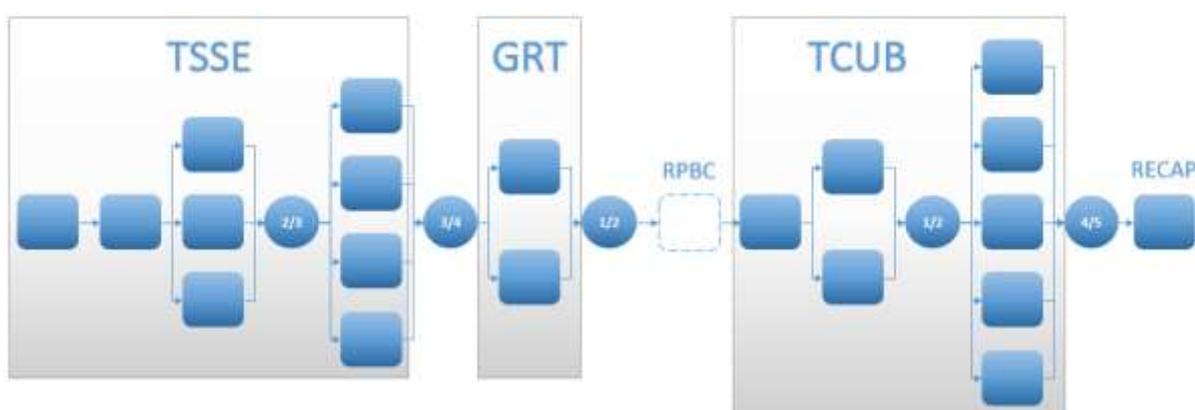


Figura 42 - Representação dos subsistemas contemplados no cenário 2
Fonte: Autoria Própria

A aplicação dos modelos de confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos foi efetuada no diagrama de blocos da Figura 43.

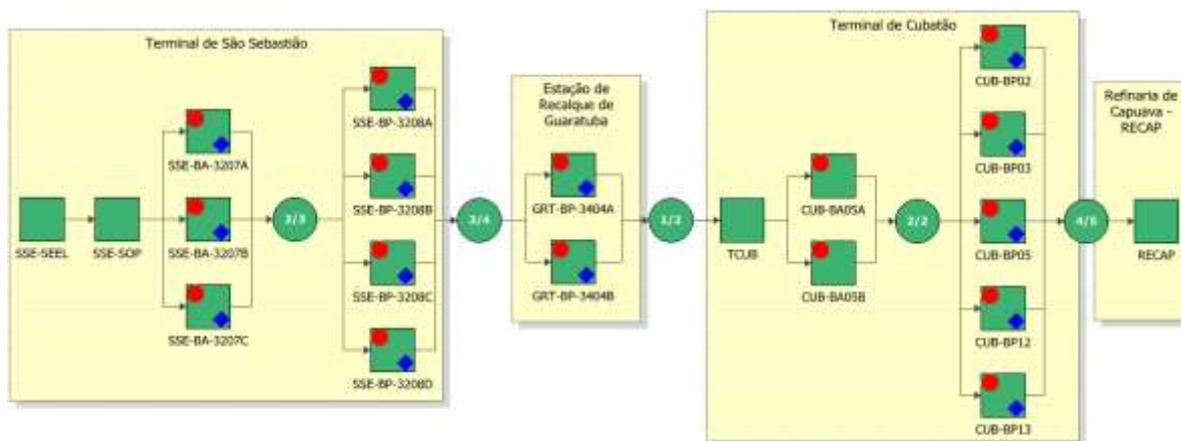


Figura 43 - Montagem do diagrama de blocos do cenário 2 no *Blocksim*
Fonte: Autoria própria

Comparando ao sistema do cenário 1, tem-se os mesmos blocos configurados até a estação de Guaratuba. A partir deste ponto, substitui-se a refinaria RPBC pelos subsistemas Terminal de Cubatão, conjunto de bombas auxiliares, bombas principais e RECAP. Tal fato representa a realidade operacional da refinaria RPBC pois, quando não está recebendo produto, ocorre apenas a virada de fluxo do duto por válvulas remoto-operadas, alinhando para a refinaria RECAP.

No bloco TCUB, foram reunidas as falhas elétricas e operacionais pois sua representação quantitativa não era destacável a ponto de merecer uma divisão como houve no caso da origem (TSSE).

No Terminal de Cubatão, o sistema conta com 2 bombas auxiliares que operam sem reserva e 5 bombas alternativas principais que operam em plena carga no regime de 4-de-5.

O bloco de destino final (RECAP) teve o mesmo critério de falhas aplicado ao bloco TCUB.

Como já citado anteriormente, os losangos azuis nos blocos indicam que eles foram configurados no esquema de *stand-by rotation*, ou seja, caso um dos demais blocos operacionais em paralelo venha a falhar, o bloco reserva inicial é ativado e o bloco que falhou, após reparo, fica como reserva.

5.2.1 Resultados do Cenário 2

Efetua-se os cálculos do cenário 2 com 30.000 simulações e a visão geral do resultado está disposta no quadro da Figura 44.

Visão Geral do Sistema	
Geral	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,904839
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,032305
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,922347
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 8760:	0,9029
Confiabilidade(8760):	0
Quantidade Esperada de Falhas:	78,101533
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	7,981463
TMAPF (h):	117,849608
MTBF (Tempo Total) (h):	112,16169
MTBF (Tempo de Funcionamento) (h):	101,488234
MTBE (Tempo Total) (h):	109,315848
MTBE (Tempo de Funcionamento) (h):	98,913206
Tempo Disponível/Indisponível do Sistema	
Tempo Disponível (h):	7926,38668
Tempo Indisponível da MC (h):	680,23877
Tempo Indisponível Total (h):	833,613323
Eventos com Parada do Sistema	
Número de Falhas:	78,0255
Quantidade de MCs:	78,0255
Quantidade de Eventos OFF por Gatilho:	2,109267
Total de Eventos:	80,134767

Figura 44 – Visão Geral do Sistema no cenário 2

O resumo individual dos resultados dos blocos é representado na Figura 45.

Resumo Individual do Bloco											
Nome do Bloco	RS FCI	RS DECI	RS DTCI	Disp. Média (Todos Eventos)	Disp. Média (sem MP, OC e IP)	# Esperado Falhas	Eventos de Parada do Sistema	Tempo Indisponível do Bloco (h)	Tempo Disponível do Bloco (h)	Quantidade de MCs	Tempo Indisponível da MC (h)
GRT-BP-3404A	0,01%	0,01%	0,22%	0,5985	0,9933	2,008	0,010	3517,429	5242,571	2,008	58,386
SSE-BA-3207A	0,26%	0,36%	0,66%	0,7160	0,9785	5,417	0,285	2488,256	6271,744	5,417	188,518
SSE-BA-3207B	0,37%	0,55%	1,70%	0,6011	0,9819	6,384	0,444	3494,619	5265,381	6,384	158,351
SSE-BA-3207C	0,25%	0,38%	1,03%	0,6798	0,9862	5,057	0,302	2805,380	5954,620	5,057	121,261
SSE-BP-3208A	0,10%	0,13%	0,34%	0,8432	0,9895	2,828	0,106	1373,612	7386,388	2,828	92,388
SSE-BP-3208B	0,19%	0,31%	0,97%	0,7667	0,9952	3,875	0,249	2043,390	6716,610	3,875	42,118
SSE-BP-3208C	0,15%	0,21%	0,51%	0,7349	0,9885	4,197	0,171	2322,584	6437,416	4,197	100,809
SSE-BP-3208D	0,18%	0,28%	0,94%	0,6526	0,9908	4,163	0,221	3043,464	5716,536	4,163	80,741
GRT-BP-3404B	0,04%	0,04%	0,06%	0,4013	0,9884	1,521	0,030	5244,892	3515,108	1,521	101,816
TCUB	17,45%	17,01%	7,50%	0,9928	0,9928	13,736	13,628	63,029	8696,971	13,736	63,029
CUB-BA05A	1,85%	1,81%	2,42%	0,9977	0,9977	1,456	1,447	20,294	8739,706	1,456	20,294
CUB-BA05B	2,05%	2,00%	2,67%	0,9974	0,9974	1,614	1,604	22,367	8737,633	1,614	22,367
CUB-BP02	0,64%	1,02%	3,83%	0,8010	0,9803	5,885	0,820	1743,669	7016,331	5,885	172,615
CUB-BP03	0,64%	1,03%	4,21%	0,7924	0,9811	6,051	0,824	1818,746	6941,254	6,051	165,335
CUB-BP05	0,56%	0,85%	3,13%	0,8176	0,9745	5,426	0,683	1597,471	7162,529	5,426	223,240
CUB-BP12	0,61%	0,94%	3,58%	0,8089	0,9779	5,660	0,754	1674,361	7085,639	5,660	193,848
CUB-BP13	0,59%	0,91%	3,54%	0,7628	0,9774	5,660	0,729	2078,161	6681,839	5,660	197,899
RECAP	11,56%	11,27%	16,86%	0,9839	0,9839	9,092	9,029	141,293	8618,707	9,092	141,293
SSE-SEEL	8,83%	8,60%	2,40%	0,9977	0,9977	6,944	6,894	20,145	8739,855	6,944	20,145
SSE-SOP	53,65%	52,29%	43,45%	0,9582	0,9582	42,315	41,905	365,860	8394,140	42,315	365,860

Figura 45 - Resumo individual dos blocos no cenário 2

O Gráfico 7 mostra a Disponibilidade e a Confiabilidade do sistema no tempo. Conforme quadro da Figura 44, pode-se constatar que a confiabilidade do sistema é baixa, pois o MTBF é pouco superior a 112 horas. Ou seja, apesar do

sistema como um todo ter uma disponibilidade acima de 90%, o número de falhas que ocorre é elevado, considerado que ocorre uma a cada 4 dias e 16 horas em média.

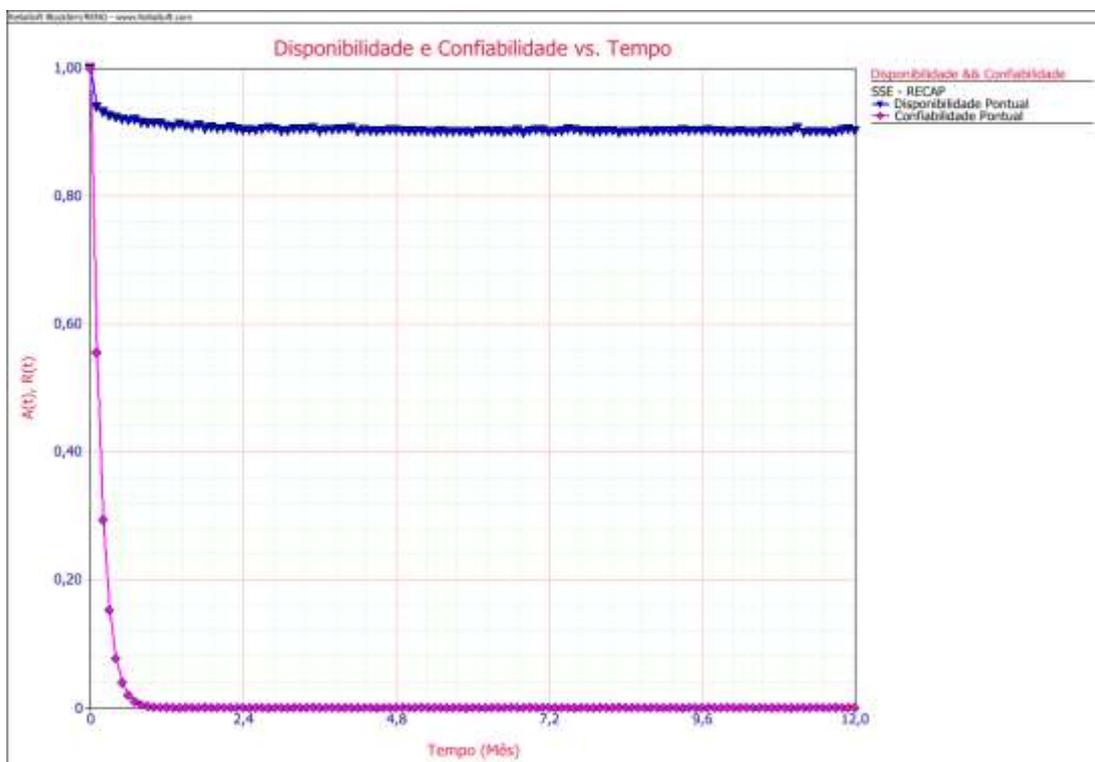


Gráfico 7 - Disponibilidade e Confiabilidade do sistema no cenário 2
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 8 demonstra os estados disponível, indisponível e tempos de aguardo dos blocos e do sistema ao longo do período de 12 meses. Nesse gráfico, observa-se a influência mais significativa dos blocos SSE-SOP, TCUB e RECAP, mesmo que qualitativamente. A influência quantitativa será apresentada nos Gráfico 11 e Gráfico 12. Pelo gráfico, também pode-se observar os tempos de aguardo dos equipamentos em estado reserva, que influenciarão a disponibilidade desses blocos. Devido a quantidade grande de blocos, o gráfico foi dividido em duas partes.

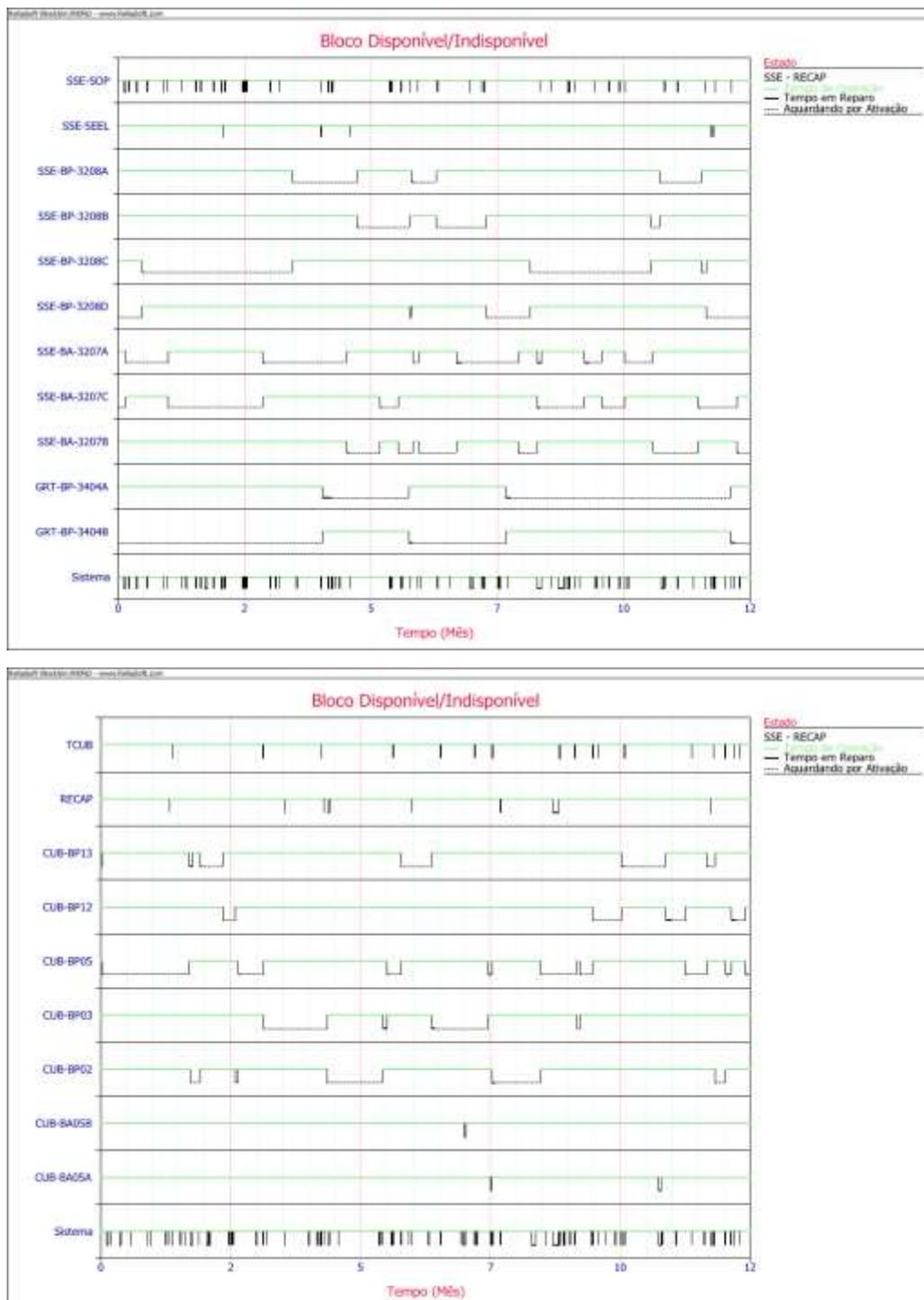


Gráfico 8 - Estado Disponível/Indisponível para os subsistemas no cenário 2
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 9 relaciona a disponibilidade de cada bloco, considerando o tempo de aguardo dos equipamentos que ficam como reserva. Esse gráfico complementa a análise qualitativa do anterior, uma vez que a escala de cor representa a porcentagem de vezes que um evento de indisponibilidade do bloco causou uma

indisponibilidade do sistema, corroborando com a análise qualitativa efetuada a partir do Gráfico 8.

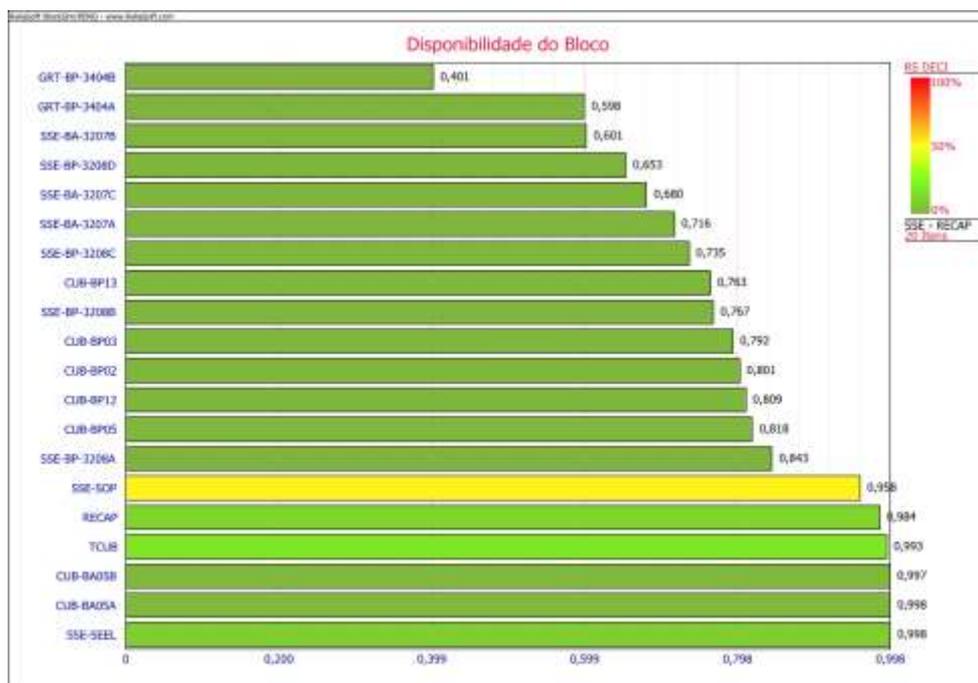


Gráfico 9 - Disponibilidade dos subsistemas no cenário 2
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 10 relaciona o número de falhas esperados no período de 12 meses para cada subsistema. A escala de cor indica a maior influência dos subsistemas SSE-SOP, CUB, RECAP e SSE-SEL no número de paradas operacionais do sistema por sua falha, em ordem decrescente. O Gráfico 11 complementa o Gráfico 10 com a quantificação dessa contribuição nas paradas.

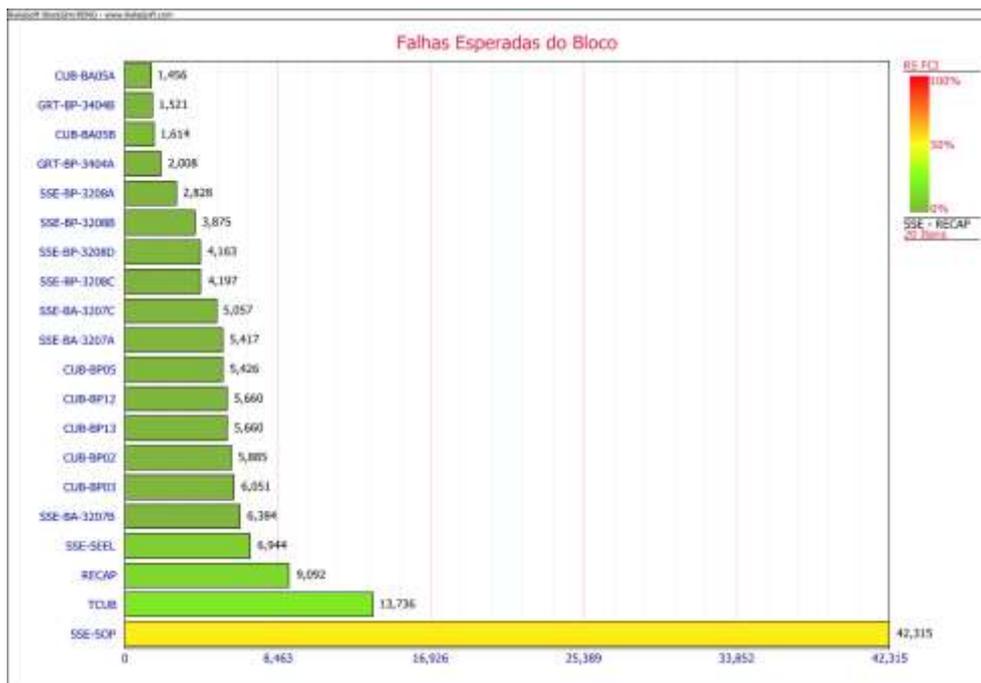


Gráfico 10 - Falhas esperadas para os subsistemas no cenário 2
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 11 representa o RS FCI – Índice de Criticidade de Falha *Reliasoft* – índice relativo que mostra o percentual de vezes que uma falha do bloco causou uma falha do sistema. É relacionado à todas as falhas, e não apenas àquelas que causaram indisponibilidade do sistema.

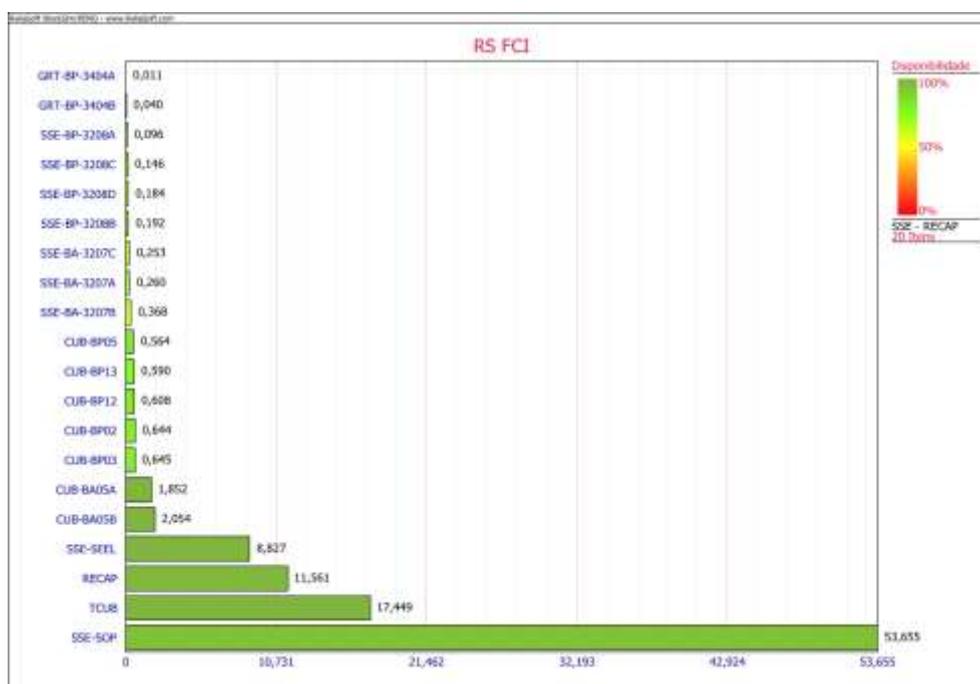


Gráfico 11 - Índice de Criticidade de Falha *Reliasoft* para o cenário 2
Fonte: Autoria própria

O Gráfico 12 representa o RS DTCI – Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema *Reliasoft* – índice relativo que mostra a contribuição de cada bloco no tempo indisponível do sistema. A escala de cor representa a disponibilidade individual do bloco.

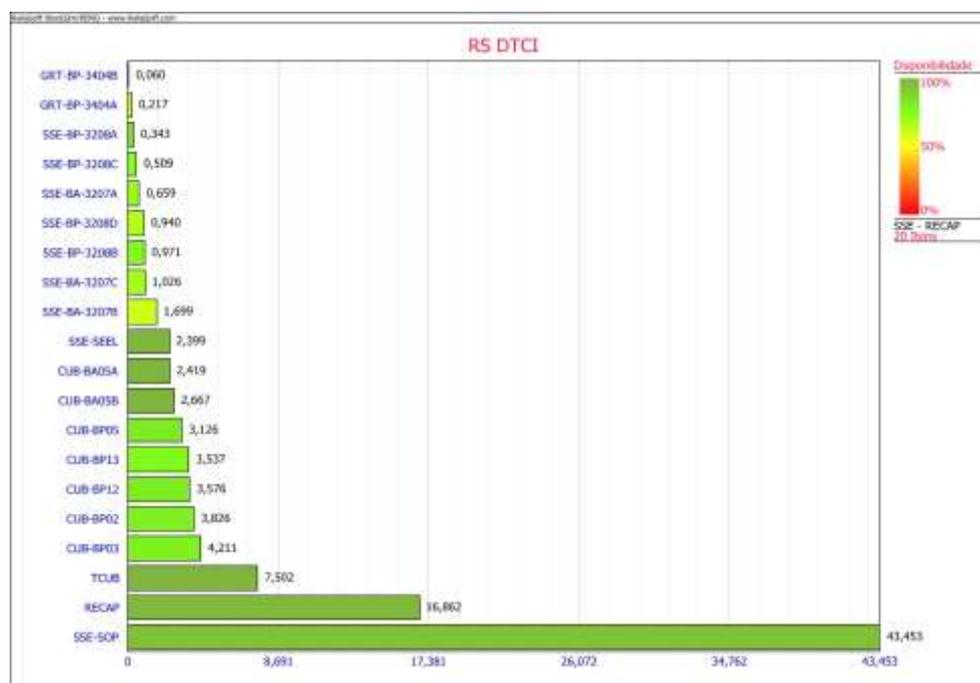


Gráfico 12 - Índice de Criticidade da Indisponibilidade do Sistema *Reliasoft* para o cenário 2
Fonte: Autoria própria

5.2.2 Interpretação dos resultados do cenário 2

A simulação dinâmica do sistema logístico reparável de abastecimento de petróleo da refinaria RECAP pelo terminal de São Sebastião para um período de 8760 horas (1 ano) apresentou como resultado uma disponibilidade média elevada (90,48%), inferior à do cenário 1, justificada pela maior quantidade de subsistemas em série. O tempo indisponível total resultante foi de 833,61 horas, com um número de 78 falhas com parada do sistema e MTBF total de 112,16 horas.

A análise dos Gráfico 8 a Gráfico 12 permite inferir que os blocos mais críticos para indisponibilidade no sistema são aqueles da unidade de origem – SSE-SOP, o bloco de destino RECAP e o intermediário TCUB. Apesar do curto período

de reestabelecimento das operações, o número de falhas apresentado nos blocos para o período é significativamente superior ao mesmo parâmetro apresentado pelos demais.

Os subsistemas de bombas auxiliares e principais de São Sebastião e principais da Estação de Guaratuba, por serem compostos de equipamentos em paralelo, conseguem assimilar razoavelmente a falha de um dos equipamentos com a entrada em operação do equipamento reserva, como pode ser observado nos tempos de aguardo do Gráfico 8. Esse tempo de aguardo teve reflexos também na disponibilidade de blocos apresentada no Gráfico 9.

Os Gráfico 11 e Gráfico 12 são extremamente interessantes do ponto de vista de análise global do sistema pois, enquanto os Gráfico 9 e Gráfico 10 tem foco em aspectos de confiabilidade apenas dos blocos, esses representam o percentual de vezes que uma falha do bloco causou uma falha do sistema (RS FCI) e a contribuição de cada bloco no tempo indisponível do sistema (RS DTCI), respectivamente.

Principalmente a partir do Gráfico 12, constata-se que as bombas auxiliares e principais de Cubatão tem relevância considerável quanto à indisponibilidade do sistema, pois apresentam-se em patamares relativos mais significativos que as bombas de Guaratuba e São Sebastião. Essas bombas do terminal de Cubatão correspondem juntas a 23,36% do tempo indisponível total do sistema, enquanto os 3 maiores causadores da indisponibilidade (SSE-SOP, RECAP e TCUB) representam juntos 67, 82%.

Assim, a conclusão da análise do cenário 2 é de que SSE-SOP, RECAP e TCUB são os principais responsáveis da indisponibilidade do sistema logístico, no entanto, as bombas auxiliares e principais de Cubatão têm contribuído de forma relevante para a redução da disponibilidade geral do sistema, assim, merecem também atenção especial para aplicação de ações de melhoria de gestão da manutenção dos ativos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma visão geral do sistema logístico de transferência de petróleo que abastece as 4 refinarias do estado de São Paulo, e se aprofundou numa análise de confiabilidade e disponibilidade do trecho desse sistema pertencente ao Litoral Paulista. O estudo utilizou os fundamentos das teorias de análise de dados de vida para obtenção dos modelos de confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos e, posteriormente, aplicou esses modelos em conjunto com os diagramas de confiabilidade para simulação de sistemas reparáveis.

O resultado do trabalho possibilitou, dentre outros aspectos, num primeiro momento: modelar e conhecer o comportamento de vida dos equipamentos e do sistema, prever o número de falha esperado para cada bloco ou todo o sistema e o tempo indisponível para cada um.

Em um segundo momento, os gráficos resultantes da simulação mostraram-se ferramentas poderosas para servir de apoio e embasamento para decisões estratégicas de manutenção. Os gráficos dos indicadores RS FCI e RS DTCL mostraram-se extremamente úteis pois são capazes de montar um *ranking* dos blocos que apresentaram maior influência seja nas falhas com parada do sistema, e dos blocos que mais contribuíram para as horas indisponíveis do sistema, respectivamente. Com essas informações e aplicando-se Pareto a esses *rankings*, pode-se conhecer os sistemas críticos seja pela ótica de falha ou pela ótica de indisponibilidade e priorizar os ativos que merecerão destaque nas estratégias de gestão da manutenção.

Isso exposto, algumas conclusões que merecem destaque:

- 1) O bloco mais influente em ambos os cenários foi o SSE-SOP. Claramente o subsistema apresentou quantidade de falhas muito acima dos demais. Logo, é recomendado uma análise mais detalhada para conhecer as causas principalmente dos eventos de falha por falta de produto na unidade de origem. Há vários fatores que podem levar a essa falha, mas o estudo não teve como objetivo aprofundar-se nas etapas anteriores às operações de expedição de petróleo a partir dos tanques de São Sebastião.

2) Os blocos RPBC, TCUB e RECAP também tem influência significativa na indisponibilidade, no entanto, os registros de falhas referem-se em sua maioria à eventos de falta de energia elétrica das concessionárias.

3) Dentre as bombas, aquelas que têm mais influência na indisponibilidade do sistema são as do terminal de Cubatão. Esses ativos têm idade avançada e a manutenção local enfrenta problemas principalmente de fornecedores para compra ou fabricação de sobressalentes.

4) Por fim, os valores obtidos para disponibilidade do sistema para ambos os cenários (superiores a 90%) confirmam que ele atende às demandas de programação de movimentação de produtos com ligeira folga. A taxa de utilização média do sistema OSBAT – OSSP P, que se observa em 2016 mesmo com a crise no setor industrial, é de aproximadamente 75% da capacidade total (TRANSPETRO, 2016).

Portanto, os resultados obtidos possibilitaram conhecer os principais responsáveis pela indisponibilidade do sistema logístico de petróleo. O próximo passo é estudar com maior detalhe as causas das falhas e focar as estratégias e ações corretivas nesses ativos.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando algumas dificuldades enfrentadas durante a elaboração do trabalho, os resultados obtidos e o potencial de aprofundamento da análise, sugere-se alguns pontos que poderiam dar continuidade ao trabalho:

- a) Obter dados mais consistentes principalmente para os tempos de reparo: em muitos casos, não havia o registro correto do tempo gasto nas atividades de manutenção corretiva, sendo necessário utilizar tempos médios após consulta aos técnicos experientes de campo. Recomenda-se atuar para aprimorar a cultura de registro das informações de manutenção na organização.
- b) Realizar um estudo de análise de causa para os modos de falhas mais frequentes dos equipamentos mais influentes em indisponibilidade e implementar MCC.

- c) Aprimorar o modelo considerando aspectos como custos de manutenção corretiva, manutenção preventiva, inspeção e lucro cessante. Se possível, elaborar um estudo de LCC para o sistema e avaliar a viabilidade de substituição de equipamentos por obsolescência.

7 REFERÊNCIAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2016. **Glossário**, disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/glossario>>. Acesso em: 11 dez. 2016, 16:12.

BASSETTO, Izeds F. F. **Estudo de confiabilidade de compressores alternativos semiherméticos de sistemas de refrigeração**. 2007. 141 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2007.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Engineering Systems**. London, England: Plenum Press, 1983.

BIROLINI, Alessandro. **Reliability engineering: theory and practice**. 5. ed. New York: Springer, 2007. 593 p.

BONACIN, A. **Foto: RECAP - Petrobras e arredores, Mauá, R.M. São Paulo, SP, Brasil**. Panoramio, 2011. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/54675137>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 21:58.

CARTER, A. D. S.; **Mechanical reliability**, 2nd ed. 492 p. London, England. Ed. Macmillan, 1986.

FILHO, Gil Branco. **Curso Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Curitiba, ABRAMAN filial VII Paraná e Santa Catarina, Março, 2005.

FONTES, E. S. **Construção e Montagem de Dutos Terrestres**. In: JANEIRO. Apoio logístico Integrado para Construção e Montagem de Dutos Terrestres. Rio de Janeiro: Puc Rio, 2008. p. 16-19 PETROBRAS. Exploração de petróleo e Gás. 2008.

FREITAS, M. A; COLOSSIMO, E. A. **Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados**. Belo Horizonte: Ed. Fundação Christiano Ottoni, 309p, 1997.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOOGLE. **Google Maps – Imagem de satélite do terminal de São Sebastião**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-23.8011223,-45.4044993,2984m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 15:30.

ILOS. **Simulação da Operação de Abastecimento das Refinarias – Análise de Capacidade**. Rio de Janeiro, 2013.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro, Qualitymark: Petrobras, 2001.

LEWIS, E. E. **Introduction to reliability engineering**. 2nd ed. New York: Ed. J. Wiley, 435p, 1996.

OLIVEIRA, André Alves; LEITE, João Paulo; MOREIRA, Willian. **Análise dos dados de vida de uma máquina extrusora de produção de tecido não tecido**. 58p. Projeto de Pesquisa – Tecnologia em Automação Industrial, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Coleção Confiabilidade: A quarta dimensão da Qualidade**. São Paulo: Reliasoft, 2006. v. 1.

PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Principais aplicações, vantagens, desvantagens e limitações das atuais distribuições estatísticas em confiabilidade**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONFIABILIDADE, 5., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2007.

_____. **A quarta dimensão da qualidade: conceitos básicos e métodos de cálculo**. São Paulo, 2006. v. 1. 353 p.

_____. **A quarta dimensão da qualidade: confiabilidade de sistemas**. São Paulo, 2007. v. 4. 157 p.

_____. **A quarta dimensão da qualidade:** manutenibilidade e disponibilidade. São Paulo, 2007. v. 5. 155 p.

PETROBRAS. **Blog Fatos e Dados: Unidades da RNEST-1 – Foto Tanque de Petróleo Maracanã.** Site da Petrobras, 2013. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/midias/unidades-da-rnest-1.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 15:43.

_____. **Fatos e Dados - Refinaria de Capuava comemora 60 anos de atividade.** Site da Petrobras, 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/refinaria-de-capuava-comemora-60-anos-de-atividade.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 21:41.

_____. **Fatos e Dados - Refinaria Presidente Bernardes completa 60 anos de atividades em Cubatão.** Site da Petrobras, 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/refinaria-presidente-bernardes-completa-60-anos-de-atividades-em-cubatao.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 15:56.

_____. **Fluxograma de Engenharia Osbat-24" - CRU (010) - 2-D-20-14377.** Arquivo técnico da Refinaria Presidente Bernardes, 2001.

PINTO, A. K. e XAVIER, J. N.; **Manutenção: Função estratégica.** 2 ed., Ed. Qualitymark, Brasil, 2005.

PRADO, E. **Foto: Refinaria Presidente Bernardes.** Panoramio, 2014. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/105654348>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 16:00.

RELIASOFT. **Life Data Analysis Reference Book,** 2015a. Disponível em: <http://reliawiki.com/index.php/Life_Data_Analysis_Reference_Book>. Acesso em: 21 nov. 2016, 22:55.

_____. **System Analysis Reference Book**, 2015b. Disponível em: <http://www.reliawiki.org/index.php/System_Analysis_Reference>. Acesso em: 06 dez. 2016, 13:12.

SALLES, Gisele M. de O. **Análise dos dados de vida dos transformadores da usina hidroelétrica governador Bento Munhoz da Rocha Netto**. 2014. 254 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR. Curitiba, 2014.

SAP-ERP: **Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados**, módulo PM. [S.l.: s.n.], ago. 2016.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção Centrada na Confiabilidade, manual de implementação**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2005.

TERZIAN, R. L. **Conceitos e Metodologias de Gestão de Projeto e sua aplicação ao caso da Integridade da Malha Dutoviária**. Rio de Janeiro, 2005. 138p. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2005.

TRANSPETRO. **Fluxograma Operacional da Estação de Guaratuba - DE-4250.03-6000-944-PTP-001**. Arquivo técnico de Santos, 2007.

_____. **Quem Somos**. Site da Transpetro, 2013a. Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/pt_br/quem-somos.html>. Acesso em: 11 dez. 2016, 22:03.

_____. **Áreas de Negócios: Terminais Aquaviários - São Sebastião - SP**. Site da Transpetro, 2013b. Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/terminais-e-oleodutos/terminais-aquaviarios.html>. Acesso em: 21 nov. 2016, 15:09.

_____. **Terminal Aquaviário de São Sebastião – Pier de Atracação**. Site da Transpetro, 2013c. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br/data/videos/8A9D2AA043EF29F501442261B7EF73EF/video/>>. Acesso em: 21 nov. 2016, 15:35.

_____. **Áreas de Negócios: Terminais Terrestres: Cubatão - SP**. Site da Transpetro, 2013d. Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/pt_br/areas-de-negocios/terminais-e-oleodutos/terminais-terrestres.html>. Acesso em: 10 dez. 2016, 18:25.

_____. **Relatório de Movimentações em Terminais – GECOP – Novembro/2015**. TRANSPETRO/DDT/CL/LOG/MED, 2015.

_____. **SIGER: Indicador TUD – Taxa de utilização de dutos – Acumulado Janeiro a Setembro de 2016 – Sistema OSBAT**. 2016. Acesso em 12 dez. 2016, 09:40.