

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Felipe Mazurek dos Santos Pereira Lima

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUTENÇÃO PARA TURBOGERADORES EM
UM FPSO

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2016



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUTENÇÃO PARA TURBOGERADORES EM UM FPSO

Felipe Mazurek dos Santos Pereira Lima

Projeto de Graduação apresentado no Curso de Engenharia de Produção da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador:

Prof. Virgílio José M. Ferreira Filho, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2016

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUTENÇÃO PARA TURBOGERADORES EM
UM FPSO

Felipe Mazurek dos Santos Pereira Lima

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE PRODUÇÃO.

Aprovado por:

Prof. Virgílio J. M. Ferreira Filho, D.Sc. (Orientador)

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

Prof. Lino Guimarães Marujo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2016

Lima, Felipe Mazurek dos Santos Pereira

Simulação de um Sistema de Manutenção para Turbogeneradores em um FPSO – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

X, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Projeto Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Produção, 2016.

Referências Bibliográficas: p.63-64.

1. Simulação Computacional. 2. Sistemas de Manutenção.
3. Turbogeneradores.

I. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Produção. II. Simulação de um Sistema de Manutenção para Turbogeneradores em um FPSO.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial a meus pais, Humberto e Roselma e irmãos, Paulo e Lucas, por todo carinho, dedicação e apoio durante toda minha vida, sem os quais eu não teria chegado até onde cheguei.

Ao professor Virgílio pela orientação, paciência e tempo disponibilizado para que fosse possível escrever este trabalho, além de todos os conhecimentos transmitidos ao longo de minha trajetória acadêmica.

À meus amigos e professores da Engenharia de Produção, por todo aprendizado, experiência e obtidos durante todos esses anos.

Aos engenheiros entrevistados durante este trabalho, sempre muito solícitos e que contribuíram para que seu desenvolvimento fosse possível.

Felipe Mazurek

*Depois de escalar uma grande
montanha, você apenas descobre que
há muitas outras para escalar.*

Nelson Mandela

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUTENÇÃO PARA TURBOGERADORES EM UM FPSO

Felipe Mazurek dos Santos Pereira Lima

Abril/2016

Orientador: Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Curso: Engenharia de Produção

Nos últimos anos, o preço do barril de petróleo caiu consideravelmente, ameaçando a viabilidade de diversos projetos de exploração e produção de óleo e gás, especialmente aqueles relacionados às reservas do pré-sal e de xisto. Apesar disso, a demanda pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos e tecnologias para a extração de petróleo continuou crescendo de forma intensa nos últimos anos. Por dois motivos: a necessidade das empresas do setor em investir em iniciativas que aumentem a eficiência de suas operações para combater a redução de suas margens de lucro e para se preparar para o futuro, já que o mercado mantém elevadas expectativas sobre os projetos mencionados e seus retornos financeiros, apostando que a queda de preço do barril de petróleo é momentânea. Nesse sentido, este trabalho busca contribuir para uma dessas iniciativas de melhoria de operações de empresas deste setor. Seu objetivo é analisar o funcionamento e o processo de manutenção dos turbogeradores de um sistema de geração de energia numa unidade de produção de petróleo, por meio de um modelo de simulação computacional que consiga representar o sistema e possibilitar a identificação de maneiras de operá-lo de forma mais eficiente.

Palavras-chave: Simulação Computacional, Sistemas de Manutenção, Turbogeneradores.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Industrial Engineering

SIMULATION OF A MAINTENANCE SYSTEM FOR TURBOGENERATORS IN A
FLOATING PRODUCTION STORAGE AND OFFLOADING SHIP

Felipe Mazurek dos Santos Pereira Lima

April/2016

Advisor: Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Course: Industrial Engineering

In recent years, the oil price has dropped considerably, threatening the viability of many oil and gas exploration and production projects, especially those related to the pre-salt reserves and shale. Nevertheless, the demand for the development and improvement of methods and technologies for oil extraction continued to grow intensively in the last years. For two reasons: the need for oil companies to invest in initiatives that increase the efficiency of their operations to combat the profit margin reductions and to prepare for the future, as the market holds high expectations about the mentioned projects and their financial returns, betting that the price drop of the oil barrel is momentary. In this sense, this work aims to contribute to one of these improvement initiatives regarding the operations of companies in this sector. Its objective is to analyze the turbogenerators operation and maintenance processes within a power generation system at an oil production facility through a computer simulation model that represents the system and to permit the identification of ways to operate it more efficiently.

Keywords: Computer Simulation, Maintenance Systems, Turbogenerators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de Petróleo e seus principais ativos. Fonte: FERREIRA FILHO (2016)	17
Figura 2: Tipos de Sistemas Flutuantes. Fonte: CLAUSS (2007).....	19
Figura 3: Sistemas/componentes de um navio FPSO.....	20
Figura 4: Posição do turbogerador num sistema de geração de energia.....	20
Figura 5: Evolução do conceito de perda na TPM. Fonte: RODRIGUES (2014).....	21
Figura 6: Pilares da TMP. Fonte: RODRIGUES (2014).....	22
Figura 7: Categorias de manutenção (traduzida). Fonte: ISO 14224:2006(E).....	23
Figura 8: Etapas de um estudo de simulação. Fonte: BANKS <i>et al.</i> (1996).	26
Figura 9: Subsistemas de um turbogerador (Adaptada). Fonte: ISO 14224:2006(E).	30
Figura 10: Diagrama de transição de estados de uma turbomáquina.	32
Figura 11: Sobreposição de <i>downtimes</i> . Fonte: PROMODEL CORPORATION (2014).....	35
Figura 12: Teste de ajuste dos dados de manutenção corretiva para a TG1 numa amostra por minutos.	37
Figura 13: Teste de ajuste dos dados de <i>stand-by</i> para a TG1 numa amostragem por minutos.....	38
Figura 14: Detalhamento do teste de ajuste dos dados de <i>stand-by</i> para TG1 em amostra diária.....	38
Figura 15: Modelo computacional com animação gráfica ativada.....	41
Figura 16: Variáveis globais definidas no ProModel.....	42
Figura 17: Locais do modelo computacional.	42
Figura 18: Paradas por relógio da TG2 no modelo computacional.....	43
Figura 19: Lógica de parada por relógio.	43
Figura 20: Paradas por chamada e sua lógica.....	44
Figura 21: Distribuições de usuário.	45
Figura 22: Definição de entidades e suas características.	45
Figura 23: Definição das chegadas e suas características.	46
Figura 24: Processos definidos para os locais.	46
Figura 25: Definição de Sub-rotina e sua lógica.	47
Figura 26: Ativação das sub-rotinas usando macro.....	48
Figura 27: Definição de recursos e suas características no modelo computacional.....	49
Figura 28: Definição da rede de caminhos pela qual os recursos poderiam se locomover.	49
Figura 29: Relatório de resultados do ProModel.....	51
Figura 30: Modelagem as máquinas não receberem manutenção preventiva ao mesmo tempo.	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultados obtidos com a simulação final.	54
Gráfico 2: Comparação do resultado para o modelo com o tempo de simulação aumentado.	56
Gráfico 3: Comparação entre os resultados originais e a simulação com a manutenção corretiva padronizada com distribuição exponencial.	57
Gráfico 4: Comparação dos resultados originais e da simulação com distribuição <i>Gamma</i> para os tempos de <i>stand-by</i>	58
Gráfico 5: Comparação entre os resultados originais e a simulação os tempos de <i>stand-by</i> utilizando uma amostragem mensal.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Definições de tempo relacionadas ao funcionamento de uma máquina (adaptado). Fonte: ISO 14224:2006(E).	24
Tabela 2: Frequência de realização de manutenção preventiva.	28
Tabela 3: Duração e homem/hora estimado para cada manutenção preventiva.	29
Tabela 4: Locais do modelo conceitual e suas capacidades.	33
Tabela 5: Recursos do modelo conceitual e seus estados.	33
Tabela 6: Entidades do modelo conceitual e suas atividades.	33
Tabela 7: Resumo dos resultados de aderência dos dados por tipo de amostragem.	39
Tabela 8: Tabela resumo com as distribuições e amostragem selecionadas para <i>stand-by</i>	39
Tabela 9: Tabela resumo com as distribuições e amostragem escolhidas para manutenção corretiva.	39
Tabela 10: Frequência de eventos de <i>Stand-by</i>	40
Tabela 11: Frequência de eventos de manutenção corretiva.	40
Tabela 12: Parâmetros Gerais da Simulação.	41
Tabela 13: Tabela resumo para lógica de parada por relógio.	44
Tabela 14: Características do computador utilizado para executar a simulação.	50
Tabela 15: Esforço computacional para execução do modelo.	50
Tabela 16: Resultados obtidos com o modelo inicial.	52
Tabela 17: Resultados obtidos com o modelo ajustado.	53
Tabela 18: Resultados obtidos com o modelo final.	54
Tabela 19: Utilização do mecânico de bordo.	55
Tabela 20: Resultado da simulação com o tempo de simulação aumentado.	55
Tabela 21: Comparativo entre a simulação validada e a simulação da manutenção corretiva padronizada com a distribuição exponencial.	57
Tabela 22: Comparativo entre a simulação validada e a simulação com distribuições de <i>stand-by</i> padronizadas.	58
Tabela 23: Comparativo entre a simulação validada e a simulação com stand-by usando amostragem mensal.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo	15
1.2. Estrutura do Trabalho	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. Cadeia Produtiva do Petróleo	17
2.2. Unidades de Produção de Petróleo	18
2.3. Conceitos de Manutenção.....	21
2.4. Simulação	24
3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	27
3.1. Detalhamento do caso em estudo	27
3.2. Fontes de dados e informações	30
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO	32
4.1. Modelo Conceitual	32
4.2. Variáveis de Resposta.....	34
4.3. Hipóteses consideradas.....	34
4.4. Codificação do Modelo	36
5. EXPERIMENTAÇÃO	51
5.1. Validação do modelo	51
5.2. Experimentações com o modelo validado	55
6. CONCLUSÃO.....	60
6.1. Críticas ao modelo	60
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	61
6.3. Aprendizado.....	62
BIBLIOGRAFIA	63
APÊNDICE A – Testes de Aderência para <i>stand-by</i>	65
APÊNDICE B – Testes de Aderência para Manutenção Corretiva	68

1. INTRODUÇÃO

Na última década, as descobertas de grandes reservas de petróleo nas camadas do pré-sal no Brasil causaram grande impacto na indústria de óleo e gás. Por conta do preço do barril de petróleo elevado, o setor considerava muito interessante a exploração de tais reservas, que apresentavam um petróleo de alta qualidade e em abundância, por mais que os investimentos necessários e os desafios técnicos fossem enormes.

Nesse sentido, a demanda pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento dos métodos utilizados para a extração de petróleo cresceu de forma intensa, especialmente ao se observar a complexidade das operações, os custos envolvidos e as escalas de produção esperadas pelo mercado. Apesar do preço do barril de petróleo ter caído consideravelmente nos últimos anos, tal demanda não cessou por conta das expectativas de retornos financeiros significativos e de que a queda de preços é momentânea.

Ao longo do ciclo de vida de uma unidade de produção de petróleo (UPP), temos um conjunto de custos bastante relevante que está relacionado aos turbogeradores da unidade, que tem por finalidade produzir a energia necessária para toda a UPP. A relevância dessas máquinas, em termos de custo, está associada aos altos investimentos realizados para adquiri-las e a seu custo operacional. Cada máquina equivale a um investimento (CAPEX) da ordem de dezenas de milhões de reais, com seu custo operacional (OPEX) em cerca de milhões de reais ao ano. Além disso, dependendo da unidade de produção, as falhas nos turbogeradores podem comprometer seriamente a produção da unidade, gerando custos de oportunidade significativos.

Em relação ao cenário de descoberta do pré-sal, segundo FERREIRA FILHO (2016), justamente pelas grandes escalas envolvidas, é razoável que a introdução de pequenas melhorias nos processos se traduza em ganhos bastante relevantes na operação como um todo. Nesse cenário, este trabalho busca estudar o comportamento dos turbogeradores e seu sistema de manutenção numa unidade de produção de petróleo do tipo FPSO (floating production, storage and Offloading) para identificar maneiras de operar o sistema de forma mais eficiente.

1.1. Objetivo

O principal objetivo do trabalho é analisar o funcionamento e o processo de manutenção dos turbogeradores de um sistema de geração de energia numa unidade de produção de petróleo. Isto é feito por meio do desenvolvimento de um modelo de simulação que consiga replicar o comportamento desses turbogeradores e seu sistema de manutenção.

O trabalho também visa atingir alguns objetivos secundários:

1. Realizar experimentos com esse modelo para identificar como o sistema reage a mudanças em seus elementos;
2. Identificar oportunidades de melhoria que consigam melhorar a eficiência do sistema.
3. Em termos de aprendizado, possibilitar a fixação dos conhecimentos das disciplinas de simulação e manutenção na indústria do petróleo.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho pode ser condensado em três grandes partes, que contém as seções apresentadas em seu sumário e esclarecem a forma como ele foi desenvolvido. São elas:

i) Contextualização

Esta parte trata das seguintes seções: 1. Introdução, 2. Referencial Teórico e 3. Descrição do sistema. A primeira seção explica os motivos para a realização do estudo em questão, fazendo uma breve apresentação do problema. Já a segunda seção, apresenta os conceitos e referências teóricas que permitirão ao leitor compreender o trabalho desenvolvido. Por fim, a última seção, delimita o sistema estudado, fornecendo detalhes sobre seu escopo e as fontes de dados e informações obtidas.

ii) Desenvolvimento do modelo

Essa parte é constituída basicamente pela seção 4. Desenvolvimento de Modelo. Esta seção apresenta de que forma optou-se por modelar o problema, conceitualmente e computacionalmente, explicitando como foram estimados os parâmetros utilizados, quais hipóteses foram consideradas e as variáveis resposta definidas.

iii) Experimentação e avaliação dos resultados

A última parte consiste nas seções 5. Experimentação e 6. Conclusão. A seção 5 trata da validação do modelo computacional gerado e sua utilização para realizar experimentos de interesse. Por fim, a sexta seção apresenta as principais conclusões sobre o modelo criado e sobre este estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cadeia Produtiva do Petróleo

De acordo com MONIÉ *et al.* (2012), a indústria do petróleo se divide em dois segmentos principais: *upstream* ou montante, e *downstream* ou jusante. O primeiro inclui as fases de exploração, desenvolvimento e produção, enquanto o segundo compreende as etapas de transporte, refino e distribuição. Alguns autores classificam as etapas de transporte e refino como *midstream*, como mostra a Figura 1.

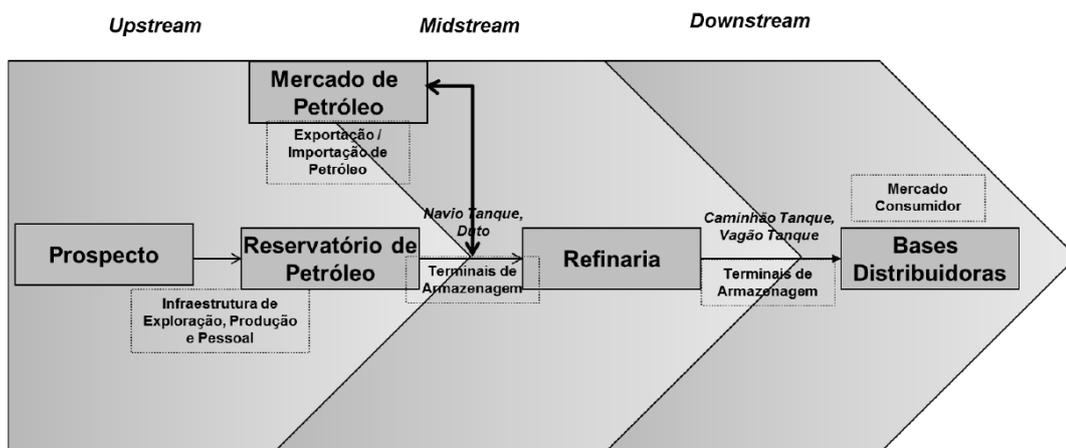


Figura 1: Cadeia de Petróleo e seus principais ativos. Fonte: FERREIRA FILHO (2016)

Segundo PIQUET *et al.* (2007), a etapa de *upstream* concentra a maior parte dos investimentos feitos da cadeia de petróleo, em torno de 80% no Brasil. De acordo com BAIN *et al.* (2009), as fases deste segmento compreendem as seguintes atividades:

- Exploração: precede as fases de desenvolvimento e produção e consiste em identificar e quantificar novas reservas de óleo e gás, por meio de análises do subsolo. Além disso, essa fase também trata do acesso a essas reservas, por meio de negociações com agentes públicos ou privados.
- Desenvolvimento: acontece logo após a fase de exploração e tem por objetivo avaliar as características e a viabilidade dos poços encontrados, por meio de um plano para a utilização dos recursos que busque maximizar a produção e os lucros ao longo do ciclo de vida do poço e inclui a definição da localização das perfurações, além das especificações da infraestrutura de produção a ser implementada.
- Produção: é a última fase do *upstream* e trata da extração do petróleo e do gás do reservatório. Para isso, utiliza diversas técnicas de recuperação, a manutenção

de níveis de extração otimizados, incluindo também a preocupação com o encerramento das atividades de produção (desativação da infraestrutura utilizada e o descarte de resíduos tóxicos).

Na fase de produção é importante ressaltar a importância do sistema de geração de energia para que os níveis de produção sejam otimizados. Segundo PERERA *et al.* (2015), plantas industriais de energia são sistemas críticos em plataformas *offshore*. Isto porque elas afetam diretamente a produção das unidades, podendo gerar perdas significativas, além de apresentarem custos significativos operacionais e de investimento.

Existem ainda atividades que são essenciais ao segmento de *upstream*: as atividades de apoio logístico. De acordo com BAIN *et al.* (2009), essas atividades têm por objetivo lidar com o transporte de insumos, equipamentos e pessoas para as unidades de produção e podem ser divididas em dois tipos: apoio marítimo e apoio aéreo.

O primeiro tipo consiste no transporte de materiais e equipamentos entre a costa e às unidades de produção utilizando de modais marítimos. Já o segundo tem foco no transporte de pessoas entre as plataformas e a costa, por meio da utilização de modais aeroportuários.

Por fim, as fases do setor de *downstream* apresentam as seguintes atividades:

- Transporte: compreende a transferência da produção dos campos petrolíferos para as refinarias. Tal transporte é feito a partir de embarcações, caminhões, vagões ou tubulações (oleodutos e gasodutos).
- Refino: consiste no processamento do óleo e gás em seus derivados, por uma série de processos de separação, conversão e tratamento.
- Distribuição: trata da transferência e comercialização dos derivados resultantes da fase de refino com as distribuidoras, que são responsáveis por oferecer tais produtos ao consumidor final, por exemplo, a população de dada região.

2.2. Unidades de Produção de Petróleo

Existem diversos tipos de unidade de produção de petróleo e que são utilizadas conforme as necessidades e características que cada área de operação exige. Dentre os principais tipos de plataforma, destacam-se as plataformas fixas, as auto-elevadas e as flutuantes. Para esse trabalho, aquelas que mais importam são as flutuantes, que são apresentadas na Figura 2 .

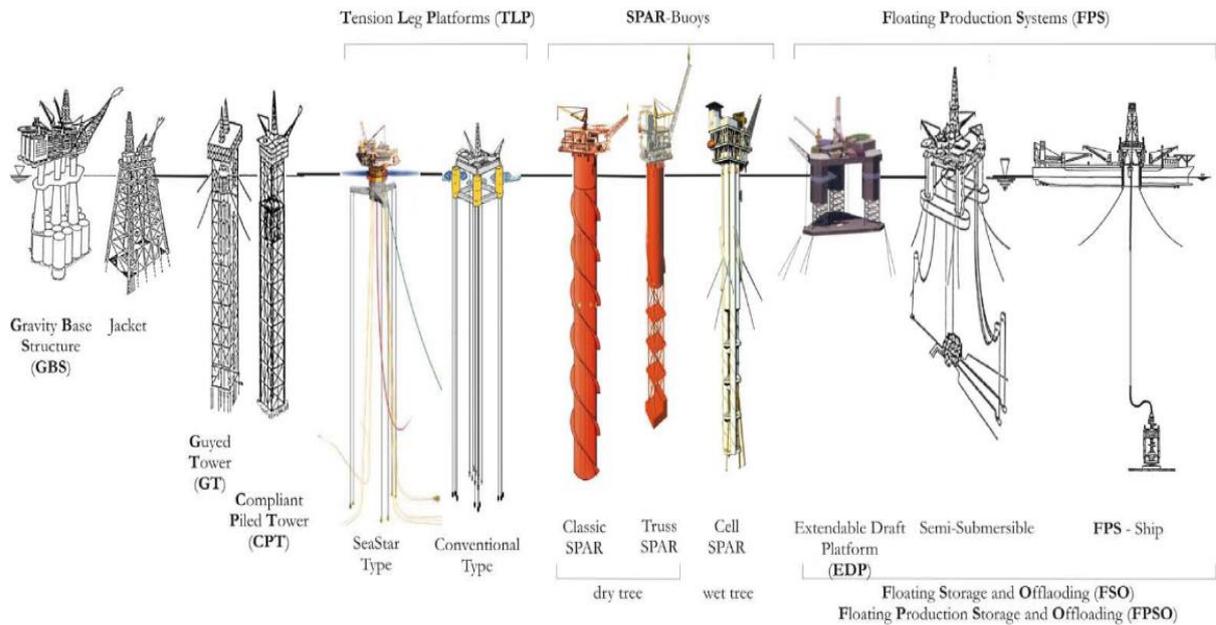


Figura 2: Tipos de Sistemas Flutuantes. Fonte: CLAUSS (2007).

Dentre os sistemas flutuantes apresentados, os navios de Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) receberão atenção especial. Segundo MITRA (2009), os navios FPSO são utilizados para a extração de óleo em águas profundas e também possuem a vantagem de não necessitarem que o transporte do óleo e gás produzidos seja feito por tubulações. Por último, eles também podem ser movimentados para outro campo assim que as reservas de seu poço se esgotam.

A figura abaixo apresenta os principais subsistemas do FPSO. São eles: os subsistemas de compressão e de processamento de gás, de processamento de óleo, de tratamento e de produção de água, de geração de energia, de utilidades, de tocha de segurança (*flare*), de controle e automação e de ancoragem dos *riseres*. Todos subsistemas são alimentados pela energia gerada pelo sistema de geração de energia.

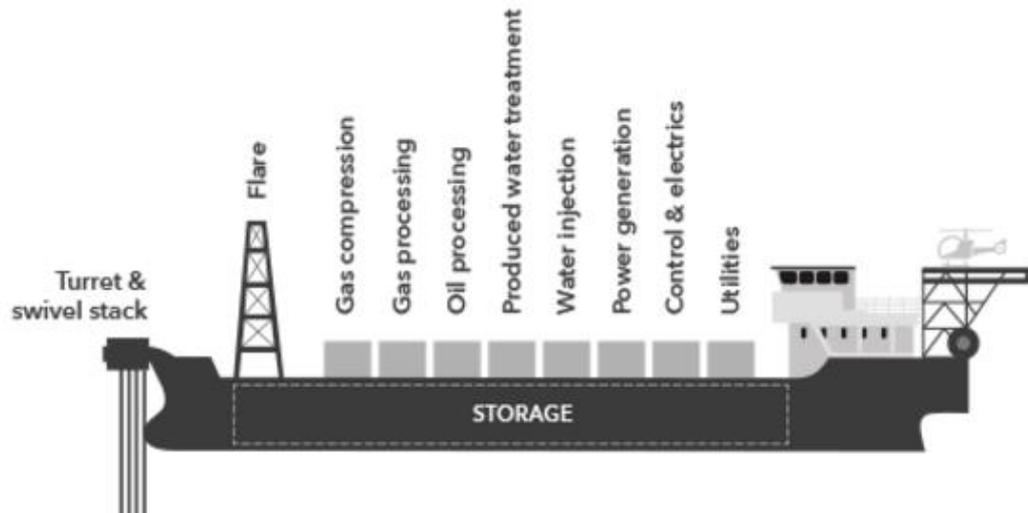


Figura 3: Sistemas/componentes de um navio FPSO.

O sistema de geração de energia é composto por um conjunto de 3 ou 4 turbogeradores, que produzem eletricidade a partir da combustão de gás natural associado ou mesmo de diesel. O turbogerador é uma máquina bastante pesada, cujo transporte e armazenamento não são simples. Logo, é difícil e custoso transportá-la até a plataforma, o que não é também uma atividade rápida de se fazer, ainda mais para plataformas em águas profundas. A posição de um turbogerador no sistema de geração é apresentada na Figura 4.

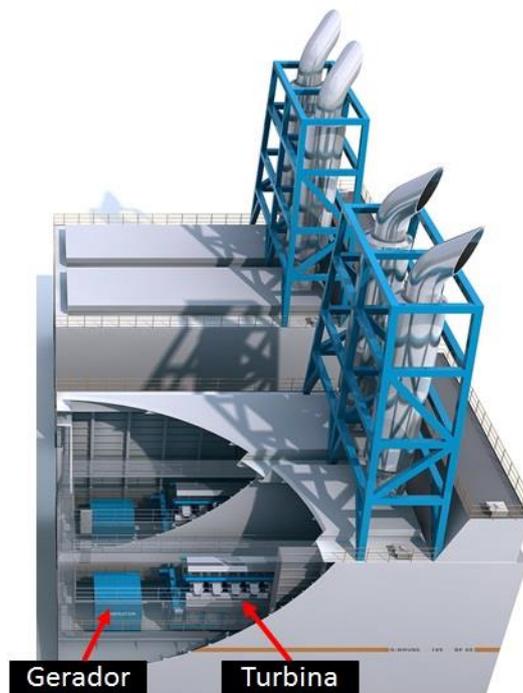


Figura 4: Posição do turbogerador num sistema de geração de energia.

O funcionamento da unidade de produção é completamente dependente do sistema de geração de energia, sem o qual não os demais sistemas do FPSO não conseguem realizar suas

funções. Tãmanha é a importância deste sistema que ele conta com uma equipe própria de manutenção na unidade de produção, além de outro setor em terra que o monitora a distância.

É importante ressaltar também a importância de uma operação para o sistema de geração de energia: o *Offloading*. Ele é uma operação de descarga do óleo armazenado no FPSO, em que as bombas de carga são acionadas para transferir esse óleo para um navio aliviador, que tem por finalidade esvaziar o tanque da unidade de produção e levar o óleo para a costa, dando sequência às demais fases da cadeia produtiva de petróleo. Esta operação demanda considerável energia do sistema de geração e acontece com uma frequência relevante.

2.3. Conceitos de Manutenção

Como observado na introdução o objetivo deste trabalho é analisar o funcionamento do processo de manutenção dos turbogeradores, desta forma nesta seção são revisados os principais conceitos de manutenção.

A manutenção produtiva total (ou Total Productive Maintenance – TPM) surgiu nos anos 70, com o objetivo de aumentar a eficiência dos equipamentos focada nas perdas por quebra. Ao longo do tempo, ela expandiu seu conceito acerca do que é uma perda, aumentando também seu escopo de atuação, conforme apresenta a Figura 5.

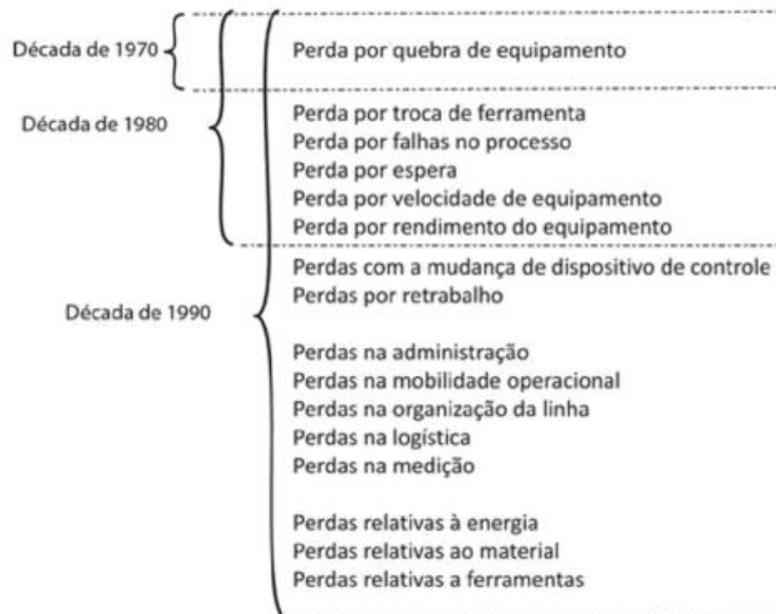


Figura 5: Evolução do conceito de perda na TPM. Fonte: RODRIGUES (2014)

Segundo RODRIGUES (2014), os objetivos da TPM são:

- **Eliminar variabilidade em processos de produção:** Evitando quebras não planejadas, aumentando a confiabilidade do processo, buscando zero falha e zero quebra.
- **Minimizar perdas:** quebras, ajustes (setup), pequenas paradas, tempo ocioso, baixa velocidade;
- **Comprometimento de todos os funcionários:** buscando o aprimoramento da manutenção e operação, maior responsabilidade dos colaboradores por suas máquinas e equipamentos, realização de atividades rotineiras de manutenção pelos operadores;
- **Mudar o Conceito tradicional:** Os atores do processo industrial passam a ter obrigações e responsabilidades sobre seu trabalho.

Para isso, a manutenção produtiva total utiliza os princípios apresentados na Figura 6 para ser implementada.



Figura 6: Pilares da TPM. Fonte: RODRIGUES (2014)

Dentre esses conceitos, são destacados a gestão da manutenção planejada, a gestão da manutenção focada e a gestão de equipamentos. Ainda segundo RODRIGUES (2014), a gestão da manutenção planejada trata da elaboração de um plano de manutenção preventiva e preditiva para maximizar a utilização do equipamento. Já a manutenção focada trata da eliminação de

perdas por meio de melhorias regulares e incrementais. Por fim, a gestão de equipamentos consiste em garantir, por meio da eficiência dos equipamentos, o atendimento das especificações do produto final com as características e especificações desejadas.

Dito isso, ainda resta explicar como as manutenções se enquadram na utilização diária dos equipamentos. Mas antes, é necessário a apresentação de algumas definições. De acordo com a ISO 14224:2006(E), existem duas categorias básicas de manutenção:

- Corretiva: feita para corrigir um item após sua falha;
- Preventiva: realizada para prevenir a falha de um item, sendo feita em intervalos pré-determinados ou de acordo com um critério pré-estabelecido para reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item. Estão incluídas nessa categoria: inspeções, ensaios e testes para verificar a condição do equipamento.

A ocorrência da manutenção antes ou depois da falha é o que separa as duas categorias de manutenção, portanto é importante defini-la. Segundo a ISO 14224:2006(E), a falha é um evento no qual determinado item perde a capacidade de desempenhar sua função. Com base nessas definições, a Figura 7 apresenta esquematicamente as categorias de manutenção descritas.

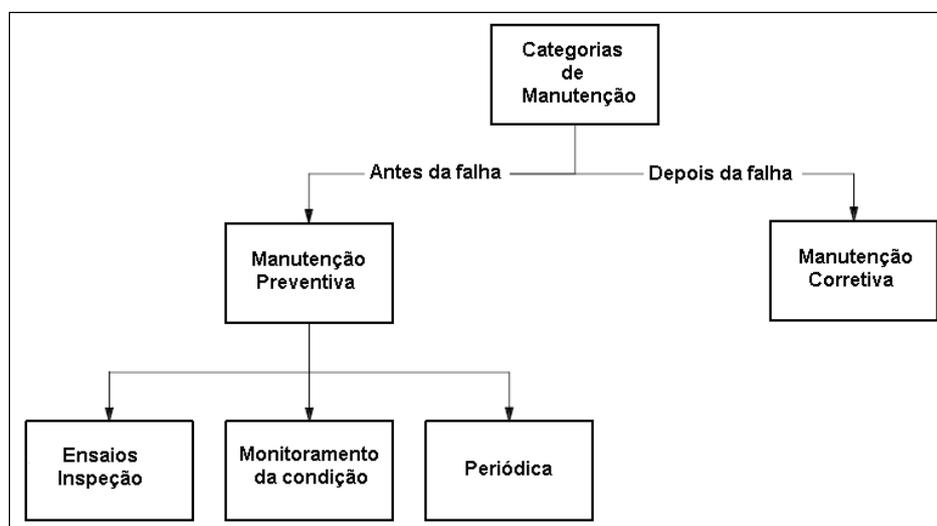


Figura 7: Categorias de manutenção (traduzida). Fonte: ISO 14224:2006(E).

A ISO 14224:2006(E) também apresenta como as manutenções se enquadram na utilização diária dos equipamentos, definindo como são compostos os tempos relacionados ao funcionamento de uma máquina, conforme apresenta a Tabela 1.

Tempo Total					
<i>Downtime</i>				<i>Uptime</i>	
Paradas planejadas		Paradas não planejadas		Tempo de operação	Tempo não operado (ou ocioso)
Manutenções preventivas	Outras paradas planejadas	Manutenções corretiva	Outras paradas não planejadas		

Tabela 1: Definições de tempo relacionadas ao funcionamento de uma máquina (adaptado). Fonte: ISO 14224:2006(E).

O tempo total (ou tempo corrido) representa a soma dos tempos de *downtime* e *uptime* de uma determinada máquina. O *downtime* representa quando a máquina está inoperante por algum motivo, devido a paradas planejadas ou não. “Outras paradas planejadas” incluem o tempo de *stand-by*¹, enquanto “outras paradas não-planejadas” incluem queda do sistema de produção como um todo, por exemplo, por falta de combustível. Já o *uptime* se refere ao tempo em que a máquina está em atividade (tempo de operação) ou inativa (tempo não operado), por não haver necessidade de utilizá-la.

O estado de *stand-by* se refere à quando uma máquina só precisa ser ativada para ser posta em funcionamento, o que somente ocorre quando há necessidade. Ele é comumente utilizado em sistemas redundantes. No caso do sistema de geração de energia de um FPSO, quando uma máquina para de operar, ou seja, entra em *downtime* por algum motivo, a máquina que está em *stand-by* rapidamente pode ser colocada em operação, evitando com que haja uma queda significativa na produção de energia para o navio.

2.4. Simulação

Os problemas encontrados pela indústria brasileira de óleo e gás tem se tornado cada vez mais complexos. Num cenário de queda de lucratividade, é importantíssimo que a tomada de decisão seja realizada de forma mais assertiva, conhecendo-se ao máximo os possíveis resultados e seu o risco atrelado. Quando esses problemas ainda incluem um grau significativo de fenômenos aleatórios, surge uma necessidade por técnicas que consigam lidar com essas questões.

¹ A 14224:2006(E) separa o *stand-by* em dois tipos: “*hot*” *stand-by* e “*cold*” *stand-by*. O primeiro trata de quando a máquina só precisa ser ativada para ser posta em funcionamento, quando o segundo requer que algumas atividades sejam realizadas para que se possa colocar a máquina em funcionamento. No entanto, para os propósitos desse trabalho essa divisão não é necessária e pode atrapalhar seu entendimento.

SHANNON (1998) define simulação como o processo de criar um modelo de um sistema real e conduzir experiências com esse modelo visando compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar as várias estratégias para operá-lo. Por conta disso, o autor defende que é crucial que o modelo seja criado de uma forma que imite o comportamento do sistema e seus eventos ao longo do tempo.

Segundo CAMPOS (2012), a simulação pode ser usada com os seguintes objetivos:

- Promover o estudo e experimentação de interações internas complexas ou de um subsistema com sistemas complexos;
- Estudar mudanças ambientais e organizacionais, bem como os efeitos das suas alterações;
- Promover a aplicação de melhorias num sistema por meio do conhecimento obtido na construção do modelo;
- Usar a simulação para fins pedagógicos para formar colaboradores e técnicos;
- Para testar novos desenhos de processos e na definição de prioridades de gestão;
- Para resolver analiticamente problemas de engenharia;

É importante mencionar que os problemas resolvidos por simulação na maior parte dos casos exigem a utilização de computadores. Segundo FERREIRA FILHO (2016) as razões mais comuns para a utilização de modelos computacionais são que o sistema real ainda não existe, a experimentação com o sistema real é dispendiosa e a experimentação com o sistema real não é apropriada.

FERREIRA FILHO (2016) também defende que existem diversos tipos de simulação. Dentre eles, o autor cita que os modelos podem ser classificados em determinísticos e estocásticos, estáticos ou dinâmicos e discretos ou contínuos. A definição de cada classificação é dada a seguir:

- Determinísticos x Estocásticos: Os modelos determinísticos são aqueles em que as variáveis de entrada ou saída são bem determinadas, enquanto os modelos estocásticos apresentam ao menos uma das variáveis de entrada ou de saída probabilística.
- Estáticos x Dinâmicos: Modelos estáticos são aqueles em que o tempo não é uma variável levada em conta, enquanto para os modelos dinâmicos o estado do sistema é baseado numa variável de tempo que muda ao decorrer do tempo.
- Discretos x Contínuos: Já modelos discretos apresentam mudanças em pontos discretos no tempo e não de forma contínua.

Por fim, de acordo com BANKS *et al.* (1996), o processo de construção de um modelo de simulação é composto por 12 etapas, conforme apresenta a Figura 8.

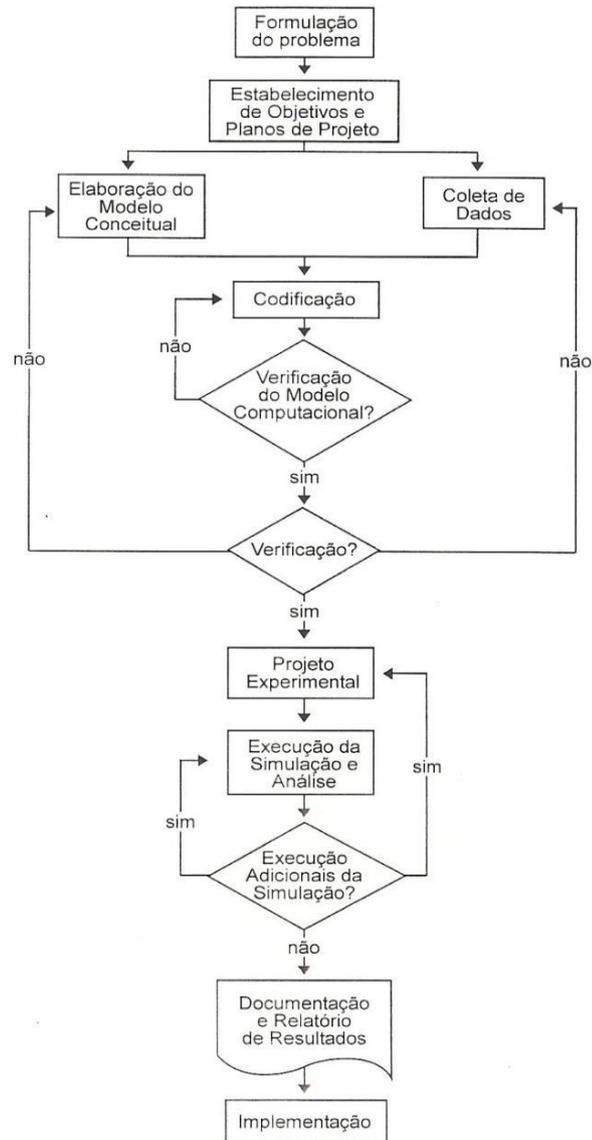


Figura 8: Etapas de um estudo de simulação. Fonte: BANKS *et al.* (1996).

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

As informações utilizadas para escrever este capítulo foram obtidas por meio de reuniões com 2 engenheiros de manutenção que estudam e/ou trabalham com a unidade de produção em questão.

3.1. Detalhamento do caso em estudo

No caso escolhido estuda-se o comportamento de um sistema de geração de uma unidade de produção do tipo FPSO. Esta unidade possui a capacidade de produção de 150 mil barris por dia e funciona continuamente (24 horas por dia, 7 dias por semana). A cada 7 dias, em média, ocorre a realização de um *Offloading*, que gera um pico na demanda por energia, o que requer um aumento de sua produção por parte dos turbogeradores durante esse período.

O sistema de geração estudado compreende 4 turbogeradores que operam em paralelo. Num cenário de operação normal, três turbogeradores operam continuamente e um deles fica em *stand-by* até que seja necessário colocá-lo em uso, devido a pelo menos um dos seguintes casos:

1. Durante um *offloading* quando é preciso absorver o aumento na demanda por energia na unidade;
2. Algum dos outros turbogeradores em operação precisa ser parado para passar por determinada manutenção.
3. Quando um dos outros 3 turbogeradores está em operação por um tempo demasiadamente longo e deve ser posto em *stand-by*, para que seu tempo total de uso não fique muito maior do que os demais, ocasionando numa chegada ao fim de vida útil da máquina antes do planejado. Isto afeta a capacidade da unidade de produção de absorver variações na demanda por energia no futuro e cria um aumento de gastos com manutenção para estender a vida útil do equipamento.

Nesse cenário, todas as máquinas acabam tendo um período de *stand-by* ao longo de sua vida útil. No entanto, é uma tarefa muito difícil prever quando uma máquina deve estar em *stand-by*, pois além das 3 situações citadas, existem diversas outras que não foram mapeadas. As regras não são muito claras e não foi possível determiná-las em conjunto com os engenheiros entrevistados para fazer esse detalhamento.

Além disso, muitas vezes, na prática, esse tempo de *stand-by* se mistura com os tempos de manutenção. Isso acontece porque os mecânicos de bordo aproveitam quando uma máquina

está em *stand-by* para realizar algumas manutenções, usufruindo do fato de que ela está parada. Aparentemente, essa é uma prática ruim, pois se uma das outras máquinas falhar enquanto o turbogerador em *stand-by* estiver sofrendo uma manutenção que o incapacite de ser ativado naquele momento, a produção pode ser afetada.

Em relação às manutenções dessas máquinas, existem dois tipos: preventivas e corretivas. As primeiras, em tese, são planejadas e realizadas de acordo com as indicações do fabricante, visando garantir que os equipamentos funcionem da maneira mais adequada e para maximizar sua vida útil. Já as manutenções corretivas decorrem da correção de problemas causados por falhas operacionais, que são aleatórias e podem acontecer em qualquer subsistema dos turbogeradores.

As manutenções preventivas devem seguir os tempos estipulados pelos fornecedores, conforme indicado pela Tabela 2. Cada atividade de manutenção pode ocorrer com base no tempo em que a máquina ficou em operação (tempo operado), que pode ser determinado por seu horímetro, ou no tempo corrido, que inclui o tempo em que a máquina não estava em operação. Ou seja, caso uma máquina tenha operado por 1000 horas, ela deve receber uma lavagem com água; no entanto, caso ela não tenha sido utilizada por 1000 horas, mas já tenha se passado 1,5 mês desde que ela iniciou sua operação, uma lavagem também deve ser realizada.

Núm.	Atividades de manutenção	Tempo operado (em horas)	Tempo corrido (em meses)
1	Lavagem com água	1000	1,5
2	Análise de óleo preditiva	1368	2,0
3	Manutenção preventiva de vibração	2052	3,0
4	Manutenção mecânica das turbinas (GGs)	4000	5,8
5	Limpeza dos filtros de ar de combustível	4000	5,8
6	Manutenção mecânica suplementar	4104	6,0
7	Termografia dos painéis elétricos	4104	6,0
8	Manutenção das baterias	4104	6,0
9	Troca dos filtros de ar de combustível	8000	11,7
10	Troca das válvulas de combustível	8208	12,0
11	Manutenção preventiva de detecção de fogo e gás	8208	12,0
12	Manutenção preventiva da instrumentação	16416	24,0
13	Revisão de meia vida (<i>Mid Life</i>)	25000	36,5
14	Vistoria por empresa especializada (<i>Overhaul</i>)	50000	73,1

Tabela 2: Frequência de realização de manutenção preventiva.

Dentre as atividades de manutenção, duas merecem atenção especial: a revisão de *Mid Life* e a vistoria por empresa especializada (*Overhaul*). Ambas necessitam que haja a remoção da turbina para envio à manutenção. Para evitar a diminuição da capacidade do sistema de geração de energia, uma outra turbina deve ser colocada no lugar daquela que é retirada e

enviada para manutenção. A turbina que é posta em uso, fica armazenada numa oficina em terra e é enviada para a unidade de produção somente quando o turbogerador em questão está próximo de requisitar uma das duas manutenções. Após o retorno da turbina enviada à manutenção, ela não necessariamente volta a ser colocada no turbogerador da qual fora retirada.

Uma estimativa de duração para cada atividade de manutenção preventiva também é estabelecida por parte do fornecedor do equipamento, observar coluna *downtime* na Tabela 3. Mais um tempo de *cooldown* (desligamento da máquina) deve ser adicionado a esse *downtime* em alguns casos, para que se possa determinar qual é o tempo real em que a máquina fica em manutenção preventiva, ou seja, o tempo em que ela não está completamente operacional. Além disso, há uma previsão de quantos homem/hora devem ser gastos para cada atividade.

Núm.	Atividades de manutenção	Homem / Hora Gasto	<i>Downtime</i> (em horas)	<i>Cooldown</i> (em horas)
1	Lavagem com água	6	7	0
2	Análise de óleo preditiva	1	0	0
3	Manutenção preventiva de vibração	4	0	0
4	Manutenção mecânica das turbinas (GGs)	10	12	1
5	Limpeza dos filtros de ar de combustão	6	3	1
6	Manutenção mecânica suplementar	6	6	1
7	Termografia dos painéis elétricos	2	0	0
8	Manutenção das baterias	12	12	0
9	Troca dos filtros de ar de combustão	6	6	1
10	Troca das válvulas de combustível	4	4	1
11	Manutenção preventiva de detecção de fogo e gás	6	3	1
12	Manutenção preventiva da instrumentação	72	72	0
13	Revisão de meia vida (<i>Mid Life</i>)	84	168	1
14	Vistoria por empresa especializada (<i>Overhaul</i>)	84	168	1

Tabela 3: Duração e homem/hora estimado para cada manutenção preventiva.

Outro ponto de interesse diz respeito aos materiais utilizados nessas atividades. Algumas delas, sempre requisitam a troca de peças, a utilização de equipamentos ou materiais específicos, o que pode afetar a realização das manutenções num caso de falta. Além disso, também há a questão do custo atrelado a esses insumos ao passar do tempo, que é significativo.

Com relação às manutenções corretivas, primeiramente é importante ressaltar que cada turbogerador é composto por um conjunto de subsistemas, cada um com uma determinada função, conforme apresenta a Figura 9. Não é de interesse deste trabalho explicar a função de todos eles, porém é relevante ressaltar que o funcionamento desses subsistemas impacta diretamente na quantidade de falhas operacionais que cada máquina tem. Além disso, todos eles podem apresentar problemas que impactem a produção de energia e gerem a necessidade de manutenções corretivas.

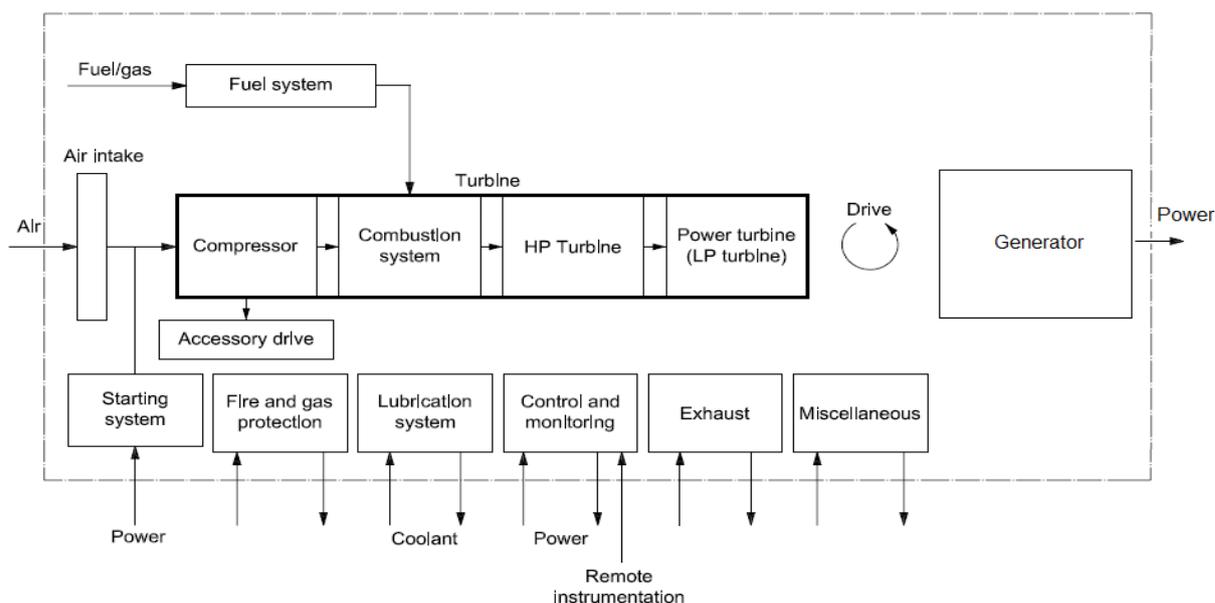


Figura 9: Subsistemas de um turbogerador (Adaptada). Fonte: ISO 14224:2006(E).

Nesse sentido, é bastante trabalhoso e complexo realizar uma análise individual dos componentes da máquina para determinar a ocorrência das falhas. Por conta disso, um comportamento único para o conjunto dessas falhas foi estudado, ou melhor, das falhas de cada turbogerador. Entretanto, analisar somente isso não é suficiente, é preciso também determinar os gastos de tempo com manutenção corretiva.

Por fim, as atividades de manutenção corretiva e preventiva são realizadas pelos mecânicos de bordo, que se localizam na oficina de bordo da unidade de produção. Existem dois mecânicos de bordo que trabalham na oficina, cada um realizando um turno de 12h por dia. Além disso, um acompanhamento do funcionamento dos turbogeradores é feito por engenheiros num centro de monitoramento em terra, durante o regime administrativo. Em situações excepcionais, também é possível recorrer aos especialistas em turbomáquinas para realizar determinadas manutenções ou mesmo auxiliar na identificação e solução de problemas relacionados às máquinas.

3.2. Fontes de dados e informações

Essa seção apresenta quais informações e fontes de dados foram disponibilizadas para a elaboração do modelo.

Primeiramente, as tabelas com informações da frequência e duração das atividades de manutenção preventiva foram utilizadas como informações para construção do modelo. Do

mesmo modo, as regras relacionadas aos processos e as atividades do sistema levantadas junto aos engenheiros entrevistados também foram usadas.

Teve-se acesso a duas bases de dados referentes ao funcionamento dos turbogeradores: uma do centro de monitoramento e outra dos mecânicos de bordo. A primeira continha uma visão mais geral acerca do funcionamento das turbomáquinas, enquanto a outra uma visão mais detalhada.

A base de dados referente ao centro de monitoramento apresentava informações para um período de aproximadamente 9,5 anos. Nesta base os dados estão segmentados para cada turbina por mês, apresentando a quantidade de horas operadas, horas disponíveis, quantidade de falhas operacionais e o tempo referente aos dias no calendário daquele mês, em horas.

Já a base referente aos mecânicos de bordo se refere a um período aproximado de 10,5 anos. Nestes dados, havia um grau de detalhamento maior, no qual foi possível identificar os eventos que ocorreram ao longo do tempo com cada máquina. Tais eventos foram divididos em: manutenção preventiva, manutenção corretiva, *stand-by* e externo. Para cada um desses tipos de eventos, havia a duração, o momento em que tiveram início e um complemento sobre a descrição do evento.

Por motivo de maior detalhamento e precisão dos dados, a base referente aos mecânicos de bordo foi a utilizada. No entanto, é importante mencionar que por se tratar de diferentes fontes de registro, divergências foram encontradas entre as bases, seja por registros aparentemente incorretos ou pela falta deles.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

4.1. Modelo Conceitual

Primeiramente, as limitações básicas do modelo foram definidas. O modelo deve retratar um sistema fechado, ou seja, a quantidade de turbogeradores e mecânicos de bordo no sistema deve ser sempre constante. Outra consideração importante é que eventos externos às máquinas, como *shutdown* da plataforma devem ser desconsiderados.

O comportamento dos turbogeradores deve funcionar como um processo estocástico, que nada mais é que a “descrição de um fenômeno aleatório que varia com o tempo” FERREIRA FILHO (2016). Além disso, ao longo do tempo, cada turbogerador apresenta um conjunto limitado e discreto de diferentes estados.

Para representar graficamente esse conjunto de estados, a utilização de um diagrama transição de estados foi escolhida. O diagrama representa todo o conjunto de estados de um processo estocástico e as probabilidades para transição entre os estados², o que é apresentado na Figura 10.

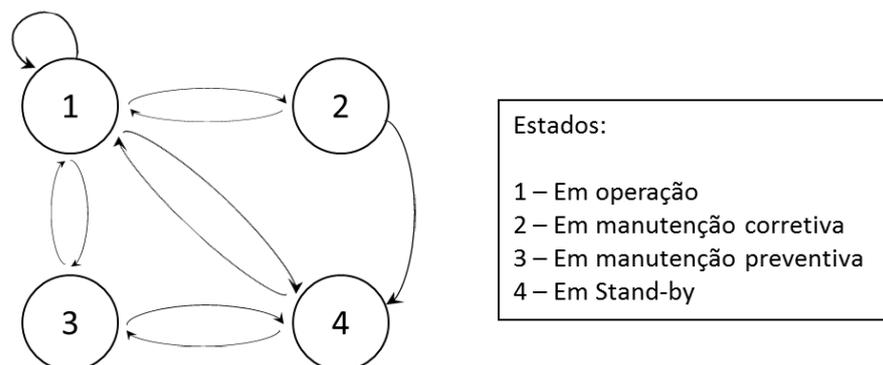


Figura 10: Diagrama de transição de estados de uma turbomáquina.

Cada arco do diagrama representa quais as transições possíveis entre os estados. Por exemplo, é possível que uma máquina que esteja em manutenção corretiva (estado 2) passe ao estado de *stand-by* (estado 4). Todavia, não é possível que ela faça o caminho oposto, saindo diretamente do estado 4 para o estado 2.

² Numa situação em que se possuísse todas as probabilidades de transição de estado, elas deveriam ser representadas no diagrama. Como não é o caso, usou-se o diagrama como uma forma mais visual de representar os estados dos turbogeradores e suas relações.

Para descrever o modelo conceitual num grau de detalhe maior, essa seção foi dividida de acordo com os elementos julgados mais relevantes para o problema. Nesse sentido, os seguintes elementos foram selecionados: locais, entidades, recursos, atividades, variáveis de resposta e hipóteses consideradas. As seções 4.1.1 à 4.3 contêm a descrição de tais itens.

4.1.1. Locais

São as posições físicas que podem ser ocupadas pelos recursos e entidades, onde ocorrem operações sobre estes últimos. No modelo elaborado, tem-se 2 tipos de locais: as turbomáquinas (TGs) e a oficina de bordo. Cada local tem uma capacidade definida que é apresentada na Tabela 4.

Quantidade	Locais	Capacidades
4	Turbogeradores	1 Turbina
1	Oficina de bordo	Ilimitado

Tabela 4: Locais do modelo conceitual e suas capacidades.

4.1.2. Recursos

Os recursos são elementos que podem ser consumidos ou não durante uma simulação e tem por objetivo viabilizar a realização de uma determinada atividade. No modelo proposto, só se contou com um tipo de recurso, o mecânico de bordo, que pode ficar em 3 estados ao longo do tempo (Tabela 5). A disciplina para atendimento de cada atividade é FIFO.

Quantidade	Recursos	Estados
1	Mecânico de Bordo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ocioso 2. Em movimentação 3. Realizando Manutenção

Tabela 5: Recursos do modelo conceitual e seus estados.

4.1.3. Entidades

Uma entidade é qualquer elemento que sofre alguma ação por parte de dos demais elementos da simulação. No caso, só um tipo de entidade foi utilizado: as turbinas (GGs). As ações que acontecem sobre as turbinas são encontradas na Tabela 6.

Quantidade	Entidade	Ações/Atividades
4	Turbina (GG)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operação 2. Manutenção Corretiva 3. Manutenção Preventiva 4. <i>Stand-by</i>

Tabela 6: Entidades do modelo conceitual e suas atividades.

Todas atividades possuem uma frequência e duração pré-definida, por meio de uma distribuição, função ou um parâmetro determinado. No caso da manutenção preventiva, convencionou-se que esta deve seguir as sugestões do fornecedor dos equipamentos (Tabela 2 e Tabela 3).

Com relação a manutenção corretiva, uma probabilidade define sua ocorrência ou não, e sua duração é determinada por meio de uma distribuição de probabilidade. A mesma modelagem é utilizada para determinar as atividades de *stand-by*. Por fim, a operação da turbina é determinada pelo tempo total da simulação, menos o tempo das outras atividades (manutenção corretiva, preventiva e *stand-by*).

4.2. Variáveis de Resposta

As variáveis de resposta do modelo determinam o que deve ser avaliado para verificar se o modelo pode ser considerado aderente à realidade. No caso, as variáveis consideradas são: os tempos totais de manutenção corretiva, de manutenção preventiva e de *stand-by* para cada turbomáquina.

4.3. Hipóteses consideradas

Essa seção apresenta as simplificações realizadas para a criação do modelo conceitual, devido à indisponibilidade de dados ou à complexidade do modelo em si. Elas são expostas nos tópicos a seguir:

1. *Locais*

- a. Não há restrição de fornecimento de combustível aos TGs.
- b. Não foi considerado o impacto do offloading no funcionamento das TGs.
- c. Quando uma turbina é retirada de uma TG para uma manutenção de *Overhaul* ou *Mid Life*, a outra turbina que é colocada em seu lugar apresenta a mesma probabilidade de falhar e distribuição de tempos de manutenção corretiva.
- d. Sendo assim, o modelo não precisa se preocupar em mapear o que acontece com a turbina que foi enviada ao fornecedor. Somente há a preocupação com o funcionamento do turbogerador, que apresenta um tempo de manutenção preventiva para troca da turbina e depois deve ser posto em operação novamente.

2. Atividades

- a. As peças e insumos para as manutenções são infinitos.
- b. Duas ou mais atividades de manutenção preventiva podem ser feitas ao mesmo tempo, contanto que respeitem as restrições de frequência e duração.
- c. A duração total de duas ou mais atividades realizadas ao mesmo tempo é sempre igual à soma da duração de ambas menos o tempo em que elas se sobrepuseram, conforme mostra a Figura 11.

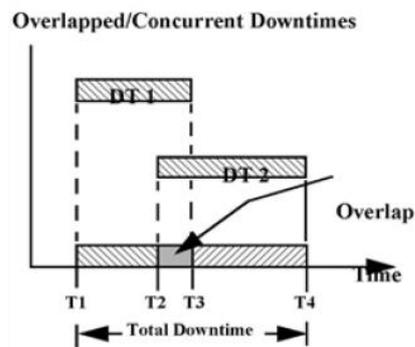


Figura 11: Sobreposição de *downtimes*. Fonte: PROMODEL CORPORATION (2014)

- d. Uma atividade de manutenção preventiva pode ser realizada quando uma máquina estiver em *stand-by*.
- e. Turbomáquinas diferentes não podem receber manutenções ao mesmo tempo, devido a limitação de somente um mecânico de bordo.
- f. Uma manutenção corretiva não pode ser feita em conjunto com uma atividade de manutenção preventiva ou *stand-by*.
- g. Para simplificar o modelo, adotou-se só o critério de tempo corrido para realizar as manutenções preventivas apresentadas na Tabela 3.

3. Recursos

- a. A troca de mecânicos de bordo a cada 12 horas é desconsiderada pela simplificação de se colocar um mecânico de bordo trabalhando 24 horas por dia e 7 dias por semana.
- b. Os tempos de movimentação para o mecânico de bordo são insignificantes, pela proximidade das turbomáquinas entre si e também da oficina de bordo.
- c. A única tarefa do mecânico de bordo é realizar as manutenções.

4.4. Codificação do Modelo

4.4.1. Software Escolhido

O software utilizado foi o Promodel. Ele é descrito como “uma tecnologia para “simulação de eventos discretos utilizada para planejar, modelar e melhorar novos ou existentes sistemas de manufatura, de logística e outros sistemas operacionais” pela PROMODEL CORPORATION (2015).

Diversos foram os motivos para sua escolha. Ele possui as funcionalidades básicas para a criação de uma simulação computacional e está disponível na universidade. Além disso, a companhia dona do FPSO possui a licença do software, o que possibilita um posterior uso do modelo desenvolvido e até mesmo permite que ele seja expandido. E, por último, o ProModel apresenta um suíte de estatística, o StatFit, que possibilita realizar a análise estatística dos dados, bem como a estimação de parâmetros para a criação da simulação.

4.4.2. Estimativas de Parâmetros

Para poder criar um modelo computacional e fazê-lo funcionar adequadamente, deve-se definir os valores das variáveis de entrada que serão utilizados. No caso, ainda é preciso determinar a frequência e o tempo para as seguintes variáveis aleatórias de entrada: manutenção corretiva e *stand-by*.

As bases de dados apresentam informações dessas variáveis para um período de 10,5 anos. A partir deles é possível determinar o tempo gasto com manutenção corretiva e *stand-by* a cada ano, mês, dia, hora ou até mesmo minuto para cada máquina. No entanto, deve existir alguma amostragem dessas, que modela melhor os dados, ou seja, que apresenta uma distribuição com melhor ajuste dos dados. Para isso, é necessário realizar um estudo estatístico com esses dados segmentados ou baseados em amostras para os períodos descritos.

Primeiramente, o comportamento dos dados foi testado numa amostra a cada minuto. A Figura 22 demonstra o resultado do ajuste dos dados de manutenção corretiva da turbina em TG1 a alguma distribuição de probabilidade.

Auto::Fit of Distributions		
distribution	rank	acceptance
Beta(0., 151, 0.667, 6.44)	0.	reject
Erlang(0., 1., 13.9)	0.	reject
Exponential(0., 13.9)	0.	reject
Gamma(0., 0.738, 18.9)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 1.02, 13.9)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.12, 8.25)	0.	reject
Lognormal(0., 1.82, 1.69)	0.	reject
Pareto	no fit	reject
Pearson 5(0., 0.357, 0.338)	0.	reject
Pearson 6(0., 787, 0.745, 42.7)	0.	reject
Triangular(0., 100, 0.)	0.	reject
Uniform(0., 99.6)	0.	reject
Weibull(0., 0.842, 12.8)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject
Rayleigh(0., 15.1)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.506, 0.41)	0.	reject
Chi Squared(0., 7.14)	0.	reject
Power Function(0., 99.9, 0.359)	0.	reject

Figura 12: Teste de ajuste dos dados de manutenção corretiva para a TG1 numa amostra por minutos.

Na Figura 12, a coluna mais à esquerda indica a distribuição na qual se tentou ajustar os dados e as duas colunas à direita indicam o resultado do ajuste. A coluna *rank* indica o quão bom é o ajuste à determinada distribuição, sendo que quanto maior o *rank*, mais aderentes os dados são àquela distribuição. Ele é calculado através da combinação de dois testes de aderência de distribuição, o teste de Anderson-Darling e Kolmogorov e Smirnov, que também determinam o resultado da coluna de aceitação.

Pela análise do *rank* e pela aceitabilidade do teste de ajuste, conclui-se que não faz sentido representar a manutenção corretiva por uma amostra a cada minuto. No entanto, o resultado é positivo para os tempos de *stand-by* na TG1 para uma amostra no mesmo período, como indica a Figura 13.

Auto::Fit of Distributions

distribution	rank	acceptance
LogLogistic(0., 1.95, 20.8)	100	do not reject
Gamma(0., 1.53, 18.4)	12.7	reject
Beta(0., 2.62e+004, 1.53, 1.42e+003)	12.7	reject
Pearson 6(0., 85., 1.88, 6.59)	10.7	reject
Weibull(0., 1.27, 30.5)	2.39	reject
Lognormal(0., 2.98, 0.963)	7.93e-004	reject
Exponential(0., 28.2)	0.	reject
Uniform(0., 99.5)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 14., 28.2)	0.	reject
Erlang(0., 2., 14.1)	0.	reject
Triangular(0., 102, 0.609)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.789, 8.62e-002)	0.	reject
Pearson 5(0., 0.8, 7.49)	0.	reject
Power Function(0., 99.5, 0.616)	0.	reject
Rayleigh(0., 25.7)	0.	reject
Chi Squared(0., 20.6)	0.	reject
Pareto	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 13: Teste de ajuste dos dados de *stand-by* para a TG1 numa amostragem por minutos.

O resultado indica que a distribuição LogLogística pode representar o comportamento da variável aleatória de *stand-by* numa amostragem por minuto. O *rank* é bastante elevado e a aderência não é rejeitada para um grau de significância de 5% (padrão do StatFit). Um detalhamento melhor dos cálculos realizados para chegar à Figura 13 se apresenta na Figura 14.

LogLogistic	
minimum	= 0. [fixed]
p	= 1.95338
beta	= 20.8126
Kolmogorov-Smirnov	
data points	505
ks stat	5.32e-002
alpha	5.e-002
ks stat[505,5.e-002]	6.01e-002
p-value	0.111
result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	
data points	505
ad stat	2.2
alpha	5.e-002
ad stat[5.e-002]	2.49
p-value	7.14e-002
result	DO NOT REJECT

Figura 14: Detalhamento do teste de ajuste dos dados de *stand-by* para TG1 em amostra diária.

A Figura 14 exibe os dois testes de aderência utilizados para verificar o grau de aderência dos dados em questão a distribuição LogLogística. Logo abaixo do nome da distribuição, na figura pode-se notar os parâmetros calculados para essa distribuição. No entanto, esse resultado positivo não se repete para os tempos de *stand-by* nas demais turbinas.

Com isso, o comportamento dos dados de ambas variáveis foi testado quando se utiliza outras amostragens: diária, quinzenal e mensal. Um resumo dos resultados desses testes é apresentado na Tabela 7. A escala utilizada na tabela varia de 1 a 5, onde quanto melhor a aderência da variável ao tipo de amostragem, mais próximo o índice é de 1 e quanto pior, mais próximo é de 5.

Variável por Tipo de Amostragem	Minuto	Hora	Dia	Quinzenal	Mensal
Manutenção Corretiva	5	4	3	2	1
Stand-by	5	4	3	1	2

Tabela 7: Resumo dos resultados de aderência dos dados por tipo de amostragem.

O critério utilizado para determinar esse índice é a quantidade de TGs com maior *rank* por tipo de amostragem. Sendo assim, os dados de todas as TGs apresentam uma maior aderência a alguma distribuição no caso da manutenção corretiva quanto a amostragem é mensal e no caso do *stand-by* quando ela é quinzenal.

Sendo assim, o modelo computacional deve sortear a cada quinze dias o valor da variável aleatória que se refere ao tempo em que a máquina deve ficar em *stand-by*. Do mesmo modo, a cada 1 mês a variável correspondente ao tempo gasto com manutenção corretiva deve ser sorteada, determinando o tempo gasto com a manutenção corretiva naquele mês.

As tabelas Tabela 8 e Tabela 9 apresentam um resumo das distribuições, seus parâmetros, o tipo de amostragem e o *rank* alcançado por cada turbogerador para cada variável aleatória.

Stand-by	Distribuição	Amostragem	Rank
TG1	Gamma (0, 1.46, 49.1)	Quinzenal	85.2
TG2	Weibull (0, 1.35, 71)	Quinzenal	100
TG3	Gamma (0, 1.52, 41.1)	Quinzenal	100
TG4	Gamma (0, 1.37, 45.1)	Quinzenal	97.1

Tabela 8: Tabela resumo com as distribuições e amostragem selecionadas para *stand-by*.

Manutenção Corretiva	Distribuição	Amostragem	Rank
TG1	Gamma (0, 0.765, 66.2)	Mensal	96.5
TG2	Beta (0, 174, 0.691, 2.46)	Mensal	62.1
TG3	Exponencial (0, 35.9)	Mensal	22.8
TG4	Beta (0, 219, 0.701, 3.13)	Mensal	100

Tabela 9: Tabela resumo com as distribuições e amostragem escolhidas para manutenção corretiva.

É interessante observar que para a manutenção corretiva, não só há *ranks* baixos para os turbogeradores B e C, como também o resultado para as distribuições variam bastante, o que pode ser consequência das inconsistências na base de dados.

Faz-se necessário ainda definir com que frequência esses tempos de manutenção corretiva e *stand-by* acontecem. Para isso, foi feita uma definição simples de probabilidade, ao se contar, por exemplo, quantas vezes o tempo de manutenção corretiva da máquina A é diferente de zero no total de períodos observados e esse número foi dividido pelo total de períodos da amostragem. Para calcular a probabilidade de não ocorrência do evento, simplesmente subtrai-se a probabilidade de o evento ser diferente de zero de 100%, chegando assim na Tabela 10 e Tabela 11.

Definição da Frequência de Eventos de <i>Stand-by</i>	TG1	TG2	TG3	TG4
Períodos com tempo de <i>stand-by</i> maior do que zero	198	177	184	183
Total de períodos (quinzenas)	253	253	253	253
Probabilidade de ocorrer 1 <i>stand-by</i> numa quinzena	78,3%	70,0%	72,7%	72,3%
Probabilidade de não ocorrer 1 <i>stand-by</i> numa quinzena	21,7%	30,0%	27,3%	27,7%

Tabela 10: Frequência de eventos de *Stand-by*.

Definição da Frequência de Eventos de Manutenção Corretiva	TG1	TG2	TG3	TG4
Períodos com tempo de manutenção corretiva maior do que zero	82	71	72	76
Total de períodos (meses)	126	126	126	126
Probabilidade de ocorrer 1 manutenção corretiva em 1 mês	65,1%	56,3%	57,1%	60,3%
Probabilidade de não ocorrer 1 manutenção corretiva em 1 mês	34,9%	43,7%	42,9%	39,7%

Tabela 11: Frequência de eventos de manutenção corretiva.

4.4.3. Modelo Computacional

Para criar o modelo de simulação no ProModel, foram definidos 7 elementos: parâmetros gerais, variáveis globais, locais, entidades, chegadas, processos e recursos. Por conta disso, essa seção foi escrita e subdividida de acordo a descrição de cada um desses elementos.

4.4.3.1. Parâmetros Gerais

Esses elementos definem como deve ser o funcionamento geral da simulação. Resume-se na Tabela 12 os parâmetros utilizados.

Parâmetros Gerais	Valor	Unidade
Tempo de Simulação (Duração da Corrida)	91.200	Horas
Tempo de Aquecimento	9.120	Horas
Número de Replicações do Experimento (ou de Corridas)	999	-
Visualização da execução (Animação)	Desativada	-

Tabela 12: Parâmetros Gerais da Simulação.

O tempo de simulação foi definido como 91200 horas pelo fato de que este tempo é equivalente ao tempo dos dados da base utilizada, o que permitiria uma comparação entre o resultado da simulação e os dados originais. Já o tempo de aquecimento equivale a 10% do tempo de simulação, pois empiricamente julgou-se que este era um tempo adequado para a estabilização do sistema. Por último, o número de replicações foi determinado como o limite disponível do ProModel para que o sistema apresentasse a menor variabilidade.

Inicialmente, a visualização da execução na forma ativada foi utilizada, mas para que a simulação fosse executada mais rapidamente, ela foi desativada. Uma foto da simulação em dois momentos distintos, com a animação gráfica ativada, é apresentada na Figura 15.

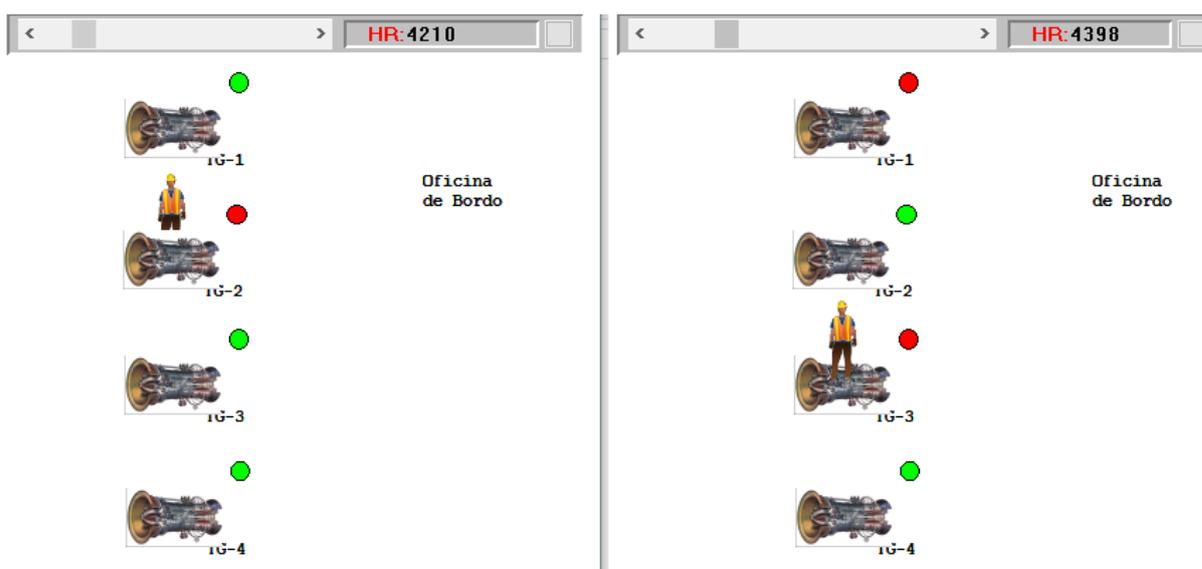


Figura 15: Modelo computacional com animação gráfica ativada.

4.4.3.2. Variáveis Globais

As variáveis globais foram definidas por dois motivos. Para permitir a determinação de parâmetros de entrada do sistema, como o tempo de aquecimento (“tempo_aquecimento”) e para poder capturar algumas das variáveis de resposta, como o tempo total de manutenção corretiva (vTMC [1, 2, 3, 4]) para cada máquina. A Figura 16 apresenta como as variáveis foram adicionadas no ProModel.

Ícone	Nome	Tipo	Valor Inicial	Estatísticas	Anotações...
Não	vMP_Hh1	Inteiro	0	Série de Temp	
Não	vMP_Hh2	Inteiro	0	Série de Temp	
Não	vMP_Hh3	Inteiro	0	Série de Temp	
Não	vMP_Hh4	Inteiro	0	Série de Temp	
Não	vTMC1	Real	0	Série de Temp	
Não	vTMC2	Real	0	Série de Temp	
Não	vTMC3	Real	0	Série de Temp	
Não	vTMC4	Real	0	Série de Temp	
Não	SomaTSb1	Real	0	Série de Temp	
Não	SomaTSb2	Real	0	Série de Temp	
Não	SomaTSb3	Real	0	Série de Temp	
Não	SomaTSb4	Real	0	Série de Temp	
Não	Tempo_Aquecimento	Real	9120	Série de Temp	

Figura 16: Variáveis globais definidas no ProModel.

As variáveis vMP_Hh [1,2,3 e 4] são utilizadas para calcular o total de homem/hora gasto pelas atividades de manutenção preventiva para cada uma das máquinas. Já as variáveis SomaTSb [1,2,3 e 4] são utilizadas para calcular o tempo total de *stand-by* para cada uma das máquinas.

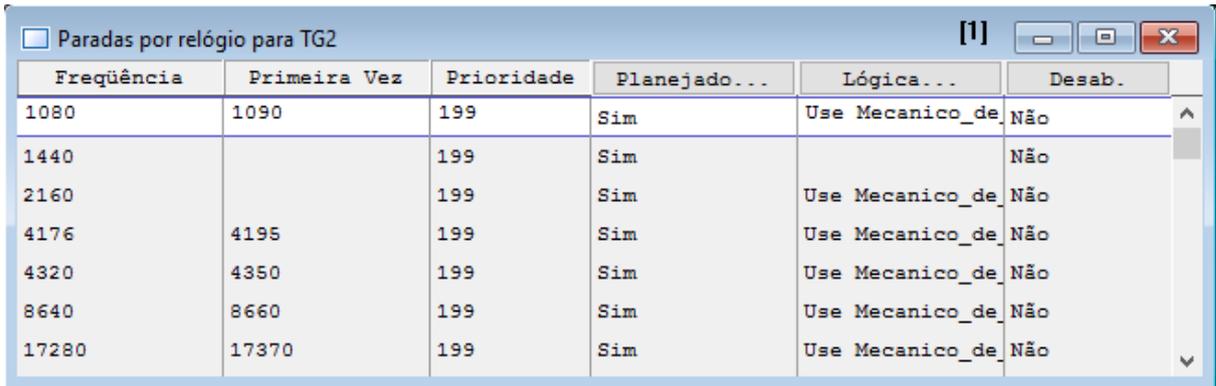
4.4.3.3. Locais

Foram definidos 5 locais sendo 4 para turbogeradores (TG 1, 2, 3 e 4) e 1 para oficina de bordo, como mostra a Figura 17. A capacidade de cada um deles é de 1 entidade por vez e cada local apresenta paradas de dois tipos: por Relógio e por Chamada (Called). Cada local armazena estatísticas de séries de tempo, menos a oficina de bordo, que não geraria informações que eram necessárias. Por fim, na coluna “Regras...” define-se como é tratada a ordem de chegada de entidades no local, que para esse modelo não é relevante.

Ícone	Nome	Cap.	Unidade	Paradas...	Estatísticas	Regras...
✘	TG1	1	1	Relógio, Called,	Série de Tem	O Mais Velho
✘	TG2	1	1	Relógio, Called,	Série de Tem	O Mais Velho
✘	TG3	1	1	Relógio, Called,	Série de Tem	O Mais Velho
✘	TG4	1	1	Relógio, Called,	Série de Tem	O Mais Velho
✘	Oficina_de_Bordo	1	1	Nenhuma	Nenhuma	O Mais Velho

Figura 17: Locais do modelo computacional.

As paradas por relógio modelam as manutenções preventivas, pois determinam quando uma turbina (entidade) deve parar de operar quando o relógio da simulação chegava a um determinado horário. As paradas por relógio da TG2 são apresentadas na Figura 18.



Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Lógica...	Desab.
1080	1090	199	Sim	Use Mecanico_de	Não
1440		199	Sim		Não
2160		199	Sim	Use Mecanico_de	Não
4176	4195	199	Sim	Use Mecanico_de	Não
4320	4350	199	Sim	Use Mecanico_de	Não
8640	8660	199	Sim	Use Mecanico_de	Não
17280	17370	199	Sim	Use Mecanico_de	Não

Figura 18: Paradas por relógio da TG2 no modelo computacional.

Na tabela apresentada pela Figura 18, todas as atividades de manutenção preventiva foram colocadas, com sua frequência e primeira vez que a parada deve acontecer. A coluna “Primeira vez” é fundamental para garantir que os tempos de manutenção preventiva entre as diferentes turbomáquinas não aconteçam ao mesmo tempo, pois as frequências das manutenções são as mesmas, mas elas não acontecem ao mesmo tempo em diferentes máquinas.

Outro ponto importante é a definição da coluna “Planejado”, que permite diferenciar se esta é uma manutenção preventiva ou corretiva. Ao colocar “sim” na coluna, indica-se ao software que aquela é uma manutenção preventiva. Na coluna lógica, deve ser escrito o código para indicar o que devia ser feito em uma determinada manutenção.



Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Lógica...	Desab.
17280	17370	199	Sim	Wait 72//Use Mec	Não
26280	26483	199	Sim	Wait 84//Use Mec	Não
52632	52835	199	Sim	Use Mecanico_de	Não


```

1 Use Mecanico_de_Bordo For 84
2 Free Mecanico_de_Bordo
3 Wait 85
4 If Clock() > Tempo_Aquecimento Then
5 {
6     vMP_Hh2 = vMP_Hh2 + 6
7 }

```

Figura 19: Lógica de parada por relógio.

O código apresentado na Figura 19 retrata a atividade de vistoria por empresa especializada (*Overhaul*). Os parâmetros utilizados são provenientes das Tabela 2 e Tabela 3, cujas informações para esta atividade em questão são sumarizadas na Tabela 13 para facilitar a leitura. A frequência apresentada na tabela, indica que a cada 52632 horas um *Overhaul* deve ser realizado, o que é uma recomendação feita pelo fornecedor do equipamento. Como somente

tem-se um homem-hora gasto de 84 horas, o mecânico de bordo só é utilizado por esse tempo e a máquina precisa aguardar parada até que o tempo do *Downtime + Cooldown* seja atingido, ou seja, um tempo de 85 horas ($169 - 84 = 85$). A variável *vMP_Hh2* calcula o homem/hora gasto para realizar a manutenção.

Núm.	Atividades de manutenção	Homem / Hora Gasto	<i>Downtime + Cooldown</i> (em horas)	Frequência [tempo corrido] (em horas)
14	Vistoria por empresa especializada (<i>Overhaul</i>)	84	169	52632

Tabela 13: Tabela resumo para lógica de parada por relógio.

O outro tipo de parada é a parada por chamada, que é utilizada para representar os tempos de *stand-by* de cada máquina. Sua diferença para a parada por relógio é que sua frequência é definida pela quantidade de vezes que ela é chamada em um processo. Fora isso, ela é uma parada planejada e com uma lógica conforme apresenta a Figura 20.

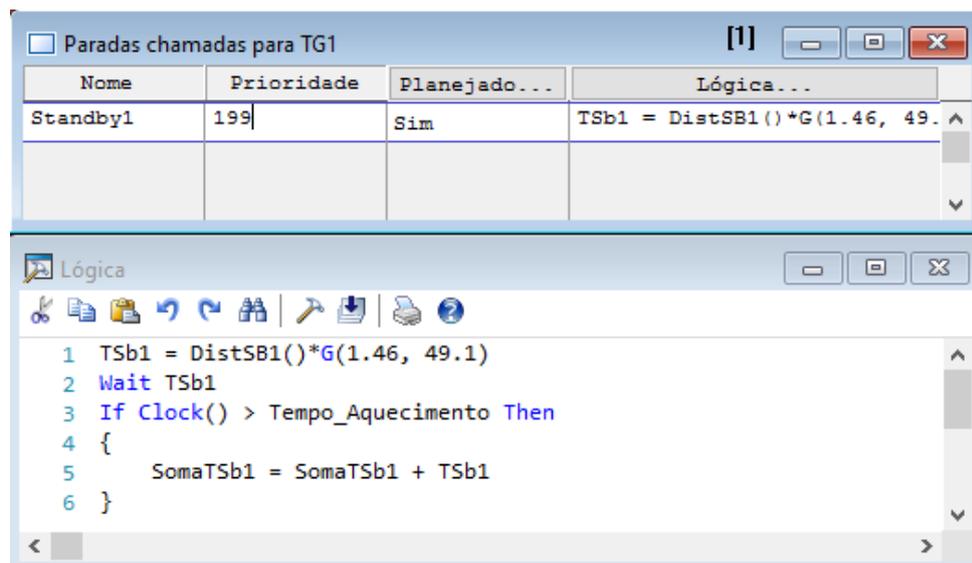
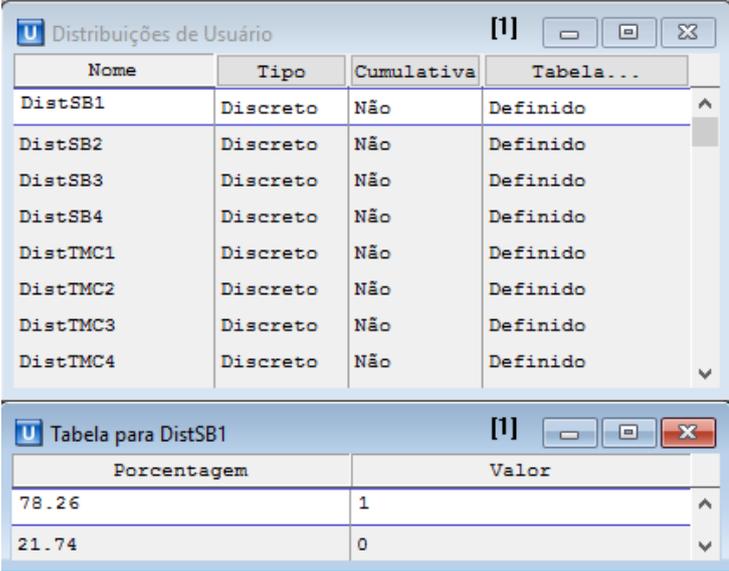


Figura 20: Paradas por chamada e sua lógica.

No código apresentado na Figura 20, a ocorrência e a duração do tempo de *stand-by* da máquina 1 é determinada pela variável *TSb1*. Ela é resultado de um sorteio da distribuição de probabilidade *DistSb1*, que retorna valores de 1 ou 0 que determina se haverá ("1") ou não ("0") *stand-by* naquele período, e havendo *stand-by*, sua duração será determinada pela distribuição de tempo Gamma [$G(1.46, 49, 1)$]. A função *Wait* faz com que a turbina entre em *stand-by* pelo tempo *TSb1* e a variável *SomaTSb1* faz a contagem de quanto tempo a turbina 1 ficou em *Stand-by*.

A distribuição de probabilidade *DistSb* (1, 2, 3 e 4) é uma distribuição de usuário. Ela é determinada com base na probabilidade da turbomáquina entrar em *stand-by* a cada 15 dias e a

Figura 21 apresenta sua configuração. A mesma lógica é aplicada para distribuições de manutenção corretiva DistTMC (1, 2, 3 e 4).



The image shows two overlapping windows from a software interface. The top window is titled 'Distribuições de Usuário' and contains a table with the following data:

Nome	Tipo	Cumulativa	Tabela...
DistSB1	Discreto	Não	Definido
DistSB2	Discreto	Não	Definido
DistSB3	Discreto	Não	Definido
DistSB4	Discreto	Não	Definido
DistTMC1	Discreto	Não	Definido
DistTMC2	Discreto	Não	Definido
DistTMC3	Discreto	Não	Definido
DistTMC4	Discreto	Não	Definido

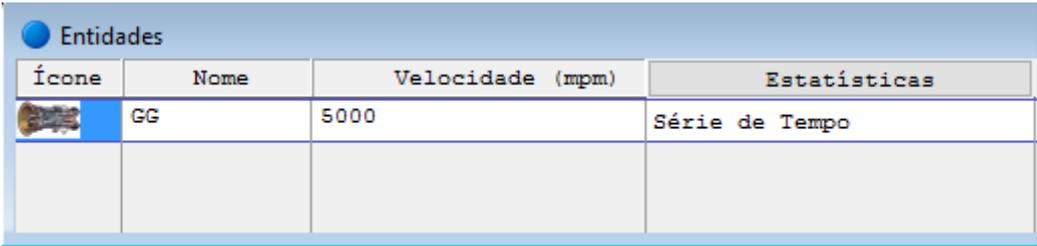
The bottom window is titled 'Tabela para DistSB1' and shows a table with two columns: 'Porcentagem' and 'Valor'.

Porcentagem	Valor
78.26	1
21.74	0

Figura 21: Distribuições de usuário.

4.4.3.4. Entidades e Chegadas

Com relação às entidades, apenas um tipo foi definido (Figura 22): a turbina (GG). Nela, se adicionou a coleta de estatísticas de tempo e uma velocidade suficientemente alta, para que quando ela entrasse no sistema, o que é definido pelas Chegadas, rapidamente ela seja colocada em sua respectiva TG.

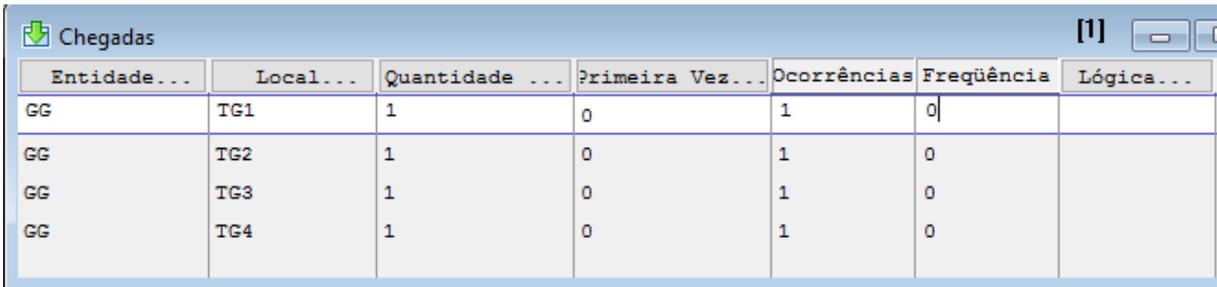


The image shows a window titled 'Entidades' with a table defining the 'GG' entity.

Ícone	Nome	Velocidade (mpm)	Estatísticas
	GG	5000	Série de Tempo

Figura 22: Definição de entidades e suas características.

Criou-se 4 chegadas de entidades GGs para cada turbogerador (TG 1, 2, 3 e 4). Somente 1 entidade chega para cada local, o que ocorre somente 1 vez e pela primeira vez no tempo zero, como se pode observar pela Figura 23. A frequência de uma nova ocorrência para cada entidade é igual a zero e não há uma lógica de chegadas definida.

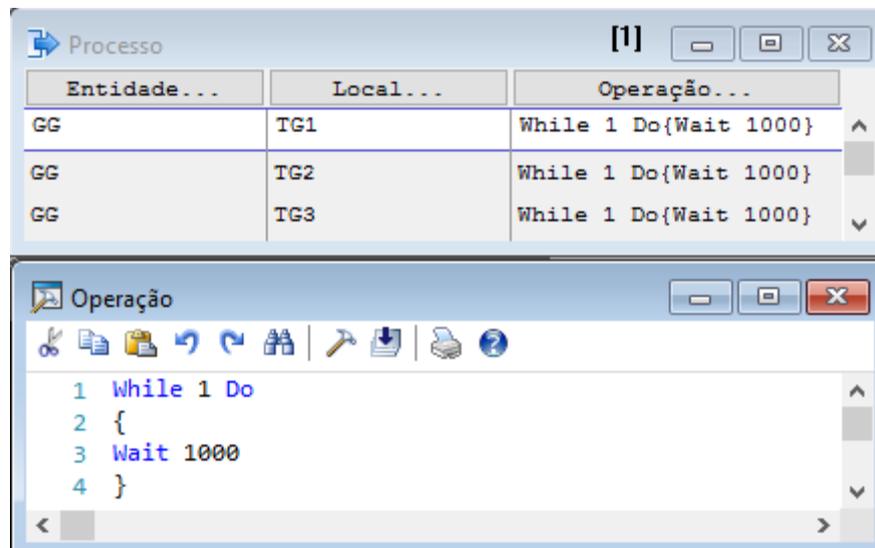


Entidade...	Local...	Quantidade ...	Primeira Vez...	Ocorrências	Frequência	Lógica...
GG	TG1	1	0	1	0	
GG	TG2	1	0	1	0	
GG	TG3	1	0	1	0	
GG	TG4	1	0	1	0	

Figura 23: Definição das chegadas e suas características.

4.4.3.5. Processos

Os processos definem o que acontece com uma entidade em um determinado local. Nesse sentido, para cada combinação GG e TG foi necessário estabelecer um processo, mas que foram todos processos iguais, como mostra a Figura 24.



Entidade...	Local...	Operação...
GG	TG1	While 1 Do{Wait 1000}
GG	TG2	While 1 Do{Wait 1000}
GG	TG3	While 1 Do{Wait 1000}

```

1 While 1 Do
2 {
3 Wait 1000
4 }

```

Figura 24: Processos definidos para os locais.

Os processos apresentados na Figura 24 serviram simplesmente para definir que cada turbina deveria ficar operando num mesmo local durante todo o tempo de simulação. Por isso, uma condição que é sempre verdadeira “While 1 Do” foi colocada no código referente ao campo “Operação”, obrigando que a máquina opere em ciclos contínuos de 1000 horas seguidas durante toda a simulação. Isso foi feito por questões de modelagem no software, o que é explicado mais à frente nesta seção do trabalho.

Ainda se faz necessário representar como acontecem as manutenções corretivas e como é feita a chamada dos *downtimes* referentes ao *stand-by* de cada turbogerador. Para isso, criou-se uma sub-rotina que faz o papel do processo para cada máquina e que é apresentada na Figura 25.

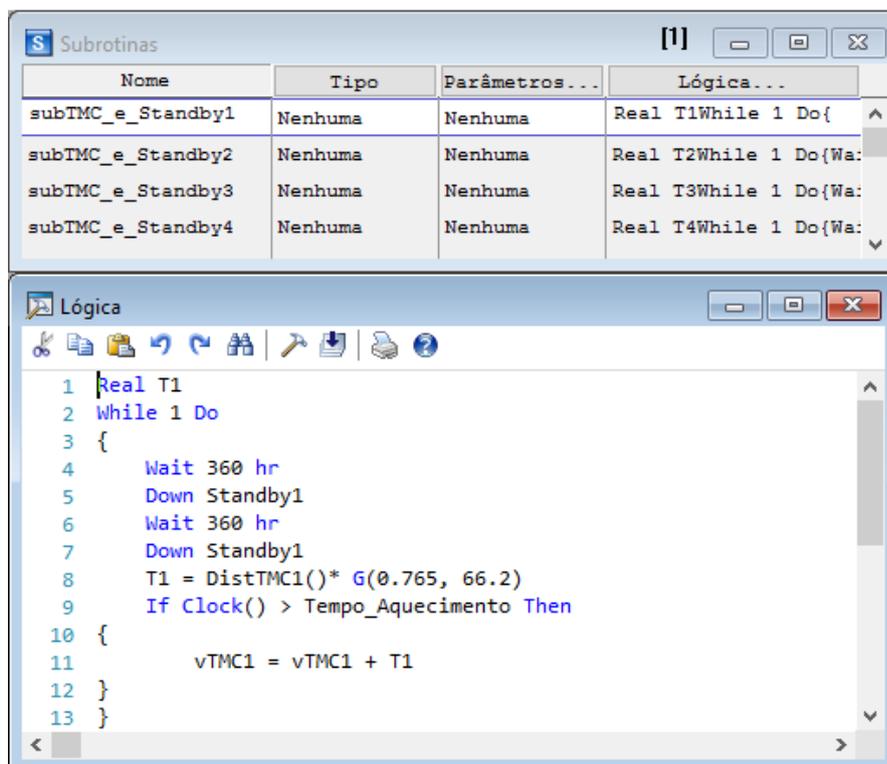


Figura 25: Definição de Sub-rotina e sua lógica.

Da mesma forma que no processo, um argumento “While” foi adicionado nas Sub-rotinas, para que a TG realize sempre as mesmas ações sobre a turbina durante todo tempo de simulação. A cada 360 horas, ou 1 quinzena, a função de parada por chamada de Standby1 é executada e realiza-se um sorteio da quantidade de tempo que o turbogerador deve ficar em *stand-by* durante as próximas 360 horas.

Independente da máquina entrar ou não em *stand-by* com a chamada da Sub-rotina, devido a sua distribuição de probabilidade, o relógio da simulação continua a contar mais 360 horas. Quando o relógio contabiliza mais 360 horas, totaliza-se 1 mês e sorteia-se o tempo T1, que se refere ao tempo de manutenção corretiva para aquele período.

O funcionamento do cálculo do tempo de manutenção corretiva é igual ao tempo de *stand-by*. Ele possui uma distribuição de probabilidade de acontecer ou não (DistTMC1, 2, 3 ou 4), que multiplica a distribuição de tempos de manutenção corretiva. No caso apresentado pela Figura 25, a distribuição Gamma foi utilizada (G(0,765, 66,2)).

Para calcular o tempo total de manutenção corretiva, uma variável (vTMC1, 2, 3, ou 4) faz o somatório desses tempos ao longo da simulação, o que somente é feito após o período de aquecimento da simulação. Da mesma forma, calcula-se o custo da utilização do mecânico de bordo. Por fim, novamente a função de parada de *stand-by* é utilizada para determinar se ao fim de mais um período de 15 dias, o turbogerador deve entrar ou não em *stand-by*.

Duas perguntas ainda precisam ser respondidas: por que se utiliza uma sub-rotina ao invés de um processo para definir o funcionamento do *stand-by* e da manutenção corretiva? E por que o tempo de manutenção corretiva não funciona como uma parada por chamada, como o *stand-by*?

A resposta da primeira pergunta está relacionada ao tempo de execução de cada código. Uma parada por chamada é considerada como um *downtime* pelo ProModel e, a cada vez que ocorre um *downtime* num determinado local, o processo do qual o local é dono é interrompido, o que afeta a contagem de tempo realizada pelo “*Wait*” dentro desse processo. Assim, o tempo contabilizado acaba sendo diferente do tempo real da simulação e o sorteio dos tempos de *stand-by* não acontece a cada 15 dias, mas em tempos superiores a uma quinzena. Isso não acontece numa Sub-rotina, que simplesmente chama a função de parada e continua a contagem de tempo por meio de seu “*Wait*” sem que ele seja interrompido.

Com relação a segunda questão, a manutenção corretiva não é colocada para funcionar como uma parada por chamada, para que não seja possível sobrepor seus tempos com os tempos de *stand-by* e manutenção preventiva. Além disso, sua colocação na Sub-rotina é feita para que sua frequência de ocorrência seja mensal.

Por fim, para que as sub-rotinas funcionem, elas devem ser iniciadas no começo da simulação, por meio de uma macro. A Figura 26 demonstra como são ativadas cada uma das sub-rotinas pela macro “Inicial”.

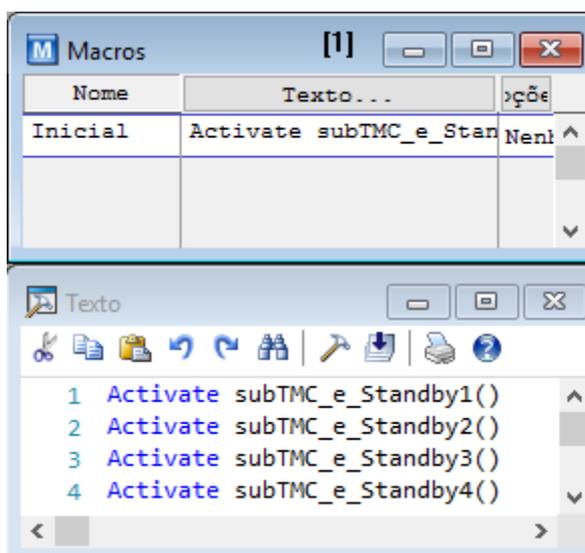


Figura 26: Ativação das sub-rotinas usando macro.

4.4.3.6. Recursos

Os últimos elementos do sistema definidos são os recursos. No modelo conceitual, só foi considerado como recurso o mecânico de bordo. Assim, a Figura 27 demonstra como ele é

acrescentado ao modelo. A figura apresenta as especificações desse recurso: a rede de caminhos, na qual ele deve se locomover, e qual é sua Base (“R1” – equivalente à oficina de bordo); que ele deve voltar à Base se estiver ocioso; e que ele deve sempre atender a entidade que estiver esperando por mais tempo.

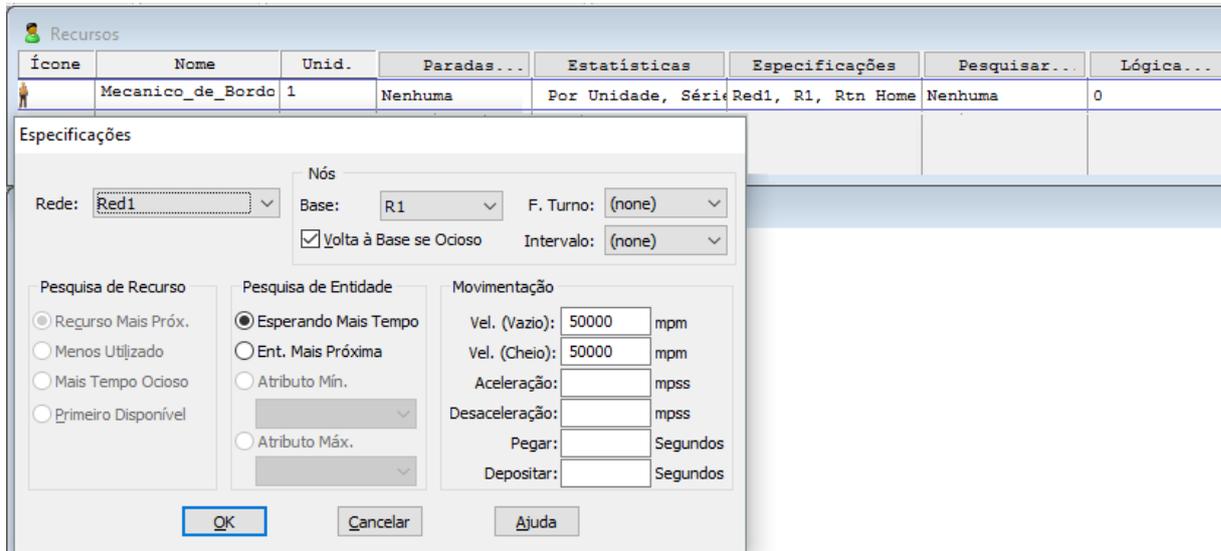


Figura 27: Definição de recursos e suas características no modelo computacional.

A rede de caminhos é apresentada na Figura 28. A partir dela, determinou-se quais rotas o mecânico pode percorrer para acessar as turbomáquinas e voltar à oficina de bordo. Além disso, como o modelo conceitual considera que seu tempo de movimentação é desprezível, cada percurso é percorrido pelo mecânico num tempo de 0,1 segundo.

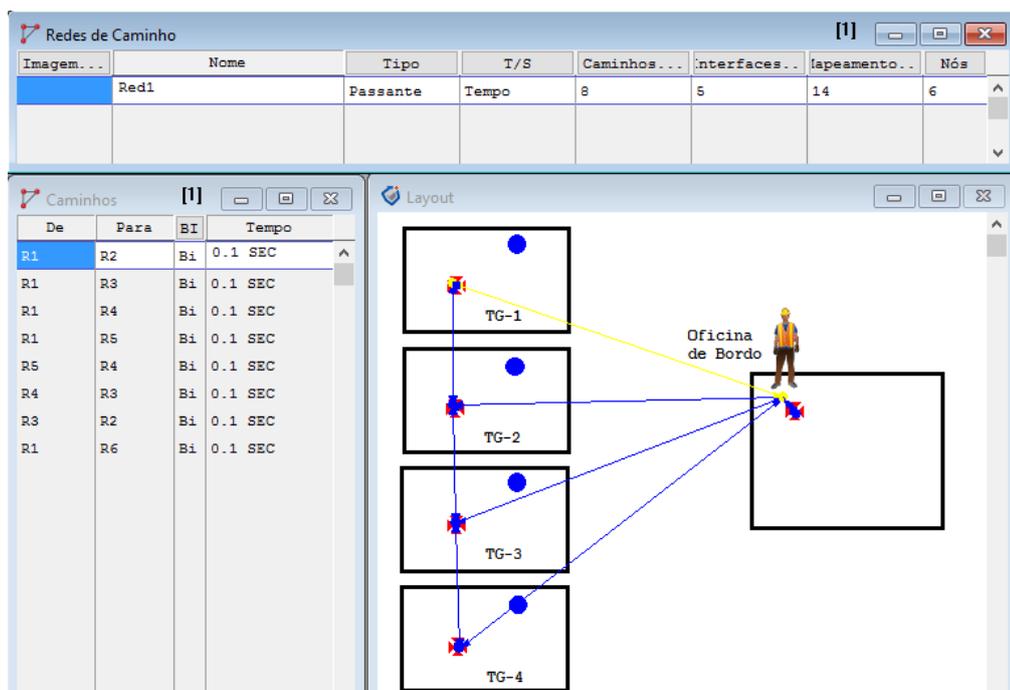


Figura 28: Definição da rede de caminhos pela qual os recursos poderiam se locomover.

4.4.4. Esforço Computacional

Para executar o modelo computacional, utilizou-se de um computador com as características apresentadas na Tabela 14.

Características do Computador Utilizado	Descrição
Sistema Operacional	Windows 10
Processador	Intel ® Core™ i5-4210U CPU @ 1.70 GHz 2.40GHz
Memória instalada (RAM)	4,00 GB
Tipo de sistema	Sistema Operacional de 64 bits, processador com base em x64

Tabela 14: Características do computador utilizado para executar a simulação.

Com esse computador, obteve-se os resultados para esforço computacional mostrados na Tabela 15. Considera-se que uma corrida tenha início no momento em que se clica em “Executar” na simulação e termina no momento em que todas as informações do Output Viewer são exibidas.

Esforço Computacional	Valor	Unidade
Corrida de Simulação	9	Segundos
Duração de Todas as Corridas de Simulação (999)	178	Segundos

Tabela 15: Esforço computacional para execução do modelo.

5. EXPERIMENTAÇÃO

Esta seção apresenta a validação do modelo computacional e a utilização do modelo validado para realizar os experimentos.

5.1. Validação do modelo

Para validar o modelo, foram utilizadas as seguintes variáveis resposta: o tempo de manutenção corretiva, o tempo de manutenção preventiva e o tempo de *stand-by* para cada uma das máquinas.

O resultado de uma ou mais corridas de simulação no ProModel podem ser observados no relatório de resultados, conforme mostra a Figura 29, de onde é possível extrair as informações referentes às variáveis resposta.

Estados dos Locais (Cap. Única) (Média Reps)				Sumário de Variáveis			
Nome	Tempo Programado (Hr)	% Operação	% Parada Não-Planejada	Nome	Total de Mudanças	Tempo Médio entre Mudanças (Hr)	Valor Atual
TG1	75.587,87	100,00	0,00	vMP Hh1	251,00	6,05	2.504,00
TG2	76.667,50	100,00	0,00	vMP Hh2	251,00	6,05	2.504,00
TG3	75.843,77	100,00	0,00	vMP Hh3	251,00	6,05	2.504,00
TG4	75.450,65	100,00	0,00	vMP Hh4	251,00	6,05	2.504,00
Oficina de Bordo	91.200,00	0,00	0,00	vTMC1	127,00	11,94	4.181,34
				vTMC2	127,00	11,94	2.756,69
				vTMC3	127,00	11,94	2.603,36
				vTMC4	127,00	11,94	3.061,60
				SomaTSb1	253,11	5,99	14.222,57
				SomaTSb2	253,10	5,99	11.520,91
				SomaTSb3	253,10	5,99	11.483,31
				SomaTSb4	253,09	5,99	11.315,28

Figura 29: Relatório de resultados do ProModel.

No quadrado vermelho a esquerda da imagem, estão os tempos programados para cada turbogerador. Para calcular a combinação dos tempos de manutenção preventiva e *stand-by*, pois eles podem ser sobrepostos, é necessário resolver a Equação 1.

$$TMP \& SB = \text{tempo de simulação} - \text{tempo programado}$$

Equação 1 – Cálculo do tempo de manutenção preventiva e *stand-by*.

TMP & SB – tempo de manutenção preventiva & *stand-by*

Assim, no caso da TG1, $TMP \& SB = 91.200 - 75.934,28 = 15.265,72$ horas. Para determinar o tempo de manutenção corretiva, basta observar as variáveis $vTMC$. No caso da turbomáquina 2, o tempo gasto com manutenção corretiva é igual a 2.756,69 horas. Com isso, resta apenas comparar os dados obtidos na simulação com os dados originais, o que é apresentado pela Tabela 16.

Conjunto de Atividades	TG1	TG2	TG3	TG4	Total Geral
$vTMC$	4.181	2.757	2.603	3.062	12.603
Erro Relativo	0,18%	1,28%	0,47%	1,35%	0,76%
TMP & SB	15.612	14.532	15.356	15.749	61.250
Erro Relativo	7,04%	21,27%	29,17%	34,13%	22,01%
Total Geral	19.793	17.289	17.960	18.811	73.853

Tabela 16: Resultados obtidos com o modelo inicial.

Como é possível observar, os resultados da simulação na parte de manutenção preventiva e *stand-by* apresentam uma variação grande em relação aos dados originais.

No modelo conceitual definiu-se que somente um mecânico de bordo seria utilizado (24/7) e que ele deveria atender cada uma das máquinas à medida que elas apresentassem a necessidade de manutenção preventiva. No mundo real, uma máquina 2 só seria parada quando o mecânico pudesse realizar uma manutenção nela, pois ele poderia estar trabalhando em uma máquina 1, por exemplo. A máquina 2 ficaria em operação mesmo que o tempo de realização da manutenção preventiva para a máquina 2 fosse alcançado, aguardando que o mecânico terminasse a manutenção na outra máquina e pudesse realizar a manutenção nela.

No ProModel, quando a hora de uma manutenção preventiva chega, ele automaticamente coloca a máquina em manutenção preventiva, mesmo que o mecânico ainda esteja realizando uma manutenção em outra máquina, o que não é realista. Por conta disso, os tempos de manutenção preventiva ficaram supervalorizados na Tabela 16.

O gargalo do processo não aparenta ser o mecânico de bordo, pois neste caso seria algo relativamente fácil de se perceber pelos gestores da plataforma e uma solução imediata seria a colocação de mais mecânicos para minimizar o problema, o que não é o caso. Por isso, uma forma de contornar a restrição imposta pelo ProModel, foi adicionar mais um pressuposto ao modelo, que a capacidade do mecânico é suficiente para atender a todas as máquinas sem gerar atrasos no atendimento das máquinas. Com isso, não é mais necessário testar o impacto do mecânico no sistema, pois sempre que uma máquina entrar em manutenção, ele poderá atendê-la adequadamente. Após essa mudança, os resultados encontrados são os apresentados na Tabela 17.

Conjunto de Atividades	TG1	TG2	TG3	TG4	Total Geral
vTMC	4.181	2.757	2.603	3.062	12.603
Erro Relativo	0,18%	1,28%	0,47%	1,35%	0,76%
TMP & SB	15.266	13.179	13.304	13.319	55.068
Erro Relativo	4,66%	9,97%	11,91%	13,43%	9,70%
Total Geral	19.447	15.936	15.908	16.380	67.671

Tabela 17: Resultados obtidos com o modelo ajustado.

A melhora nos tempos de manutenção preventiva e *stand-by* é clara e significativa. Outra hipótese está diretamente ligada à capacidade de realizar manutenções por parte do mecânico. Esta hipótese é que turbomáquinas diferentes não podem receber manutenções ao mesmo tempo, devido a limitação de somente um mecânico de bordo. Para representá-la no modelo computacional, cada manutenção preventiva é realizada pela primeira vez em um instante de tempo diferente, conforme pode-se observar na Figura 30.

Paradas por relógio para TG1				Paradas por relógio para TG2			
Freqüência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Freqüência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...
1080		199	Sim	1080	1090	199	Sim
1440		199	Sim	1440		199	Sim
2160		199	Sim	2160		199	Sim
4176		199	Sim	4176	4195	199	Sim
4320		199	Sim	4320	4350	199	Sim
8640		199	Sim	8640	8660	199	Sim
17280		199	Sim	17280	17370	199	Sim

Paradas por relógio para TG3				Paradas por relógio para TG4			
Freqüência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Freqüência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...
1080	1100	199	Sim	1080	1110	199	Sim
1440		199	Sim	1440		199	Sim
2160		199	Sim	2160		199	Sim
4176	4215	199	Sim	4176	4235	199	Sim
4320	4380	199	Sim	4320	4410	199	Sim
8640	8680	199	Sim	8640	8700	199	Sim
17280	17460	199	Sim	17280	17510	199	Sim

Figura 30: Modelagem as máquinas não receberem manutenção preventiva ao mesmo tempo.

Com isso, as máquinas não passam por uma manutenção, por exemplo de lavagem com água, ao mesmo tempo, já que a frequência e duração de cada manutenção preventiva são as mesmas para todas as máquinas. No entanto, a partir do momento que se assume que o mecânico consegue atender todas as máquinas e que não ocorrem atrasos significativos nesse atendimento, deixa de ser necessário representar essa consideração na simulação³.

³ Por mais que seja irreal representar que as manutenções preventivas podem acontecer ao mesmo tempo em diferentes máquinas, por exemplo, por conta da necessidade de parar a produção para tal, essa simplificação foi feita pela mudança das hipóteses e para verificar se o modelo melhoraria seus resultados.

Por conta disso, o modelo foi alterado novamente e seu resultado pode ser encontrado na Tabela 18. Esta tabela apresenta cada conjunto de atividades simulado e o erro em relação aos dados originais para dado conjunto e seu turbogerador.

Conjunto de Atividades	TG1	TG2	TG3	TG4	Total Geral
vTMC	4.181	2.757	2.603	3.062	12.603
Erro Relativo	0,18%	1,28%	0,47%	1,35%	0,76%
TMP & SB	15.266	12.694	12.639	12.488	53.086
Erro Relativo	4,66%	5,92%	6,31%	6,36%	5,75%
Total Geral	19.447	15.450	15.242	15.550	65.597

Tabela 18: Resultados obtidos com o modelo final.

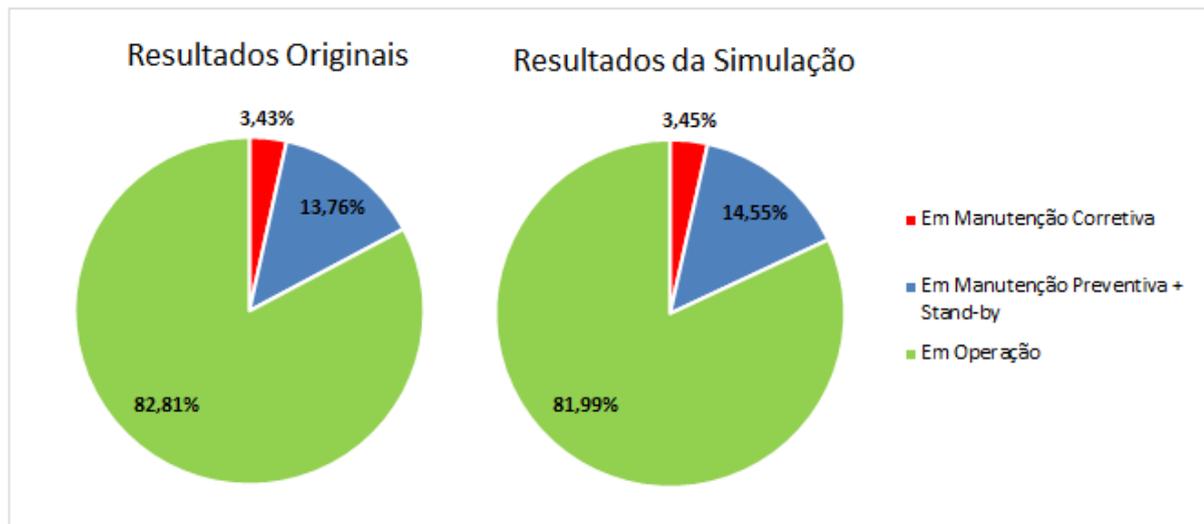


Gráfico 1: Resultados obtidos com a simulação final.

Os resultados encontrados foram muito melhores com a retirada das duas restrições, conforme também se observa no Gráfico 1. Este gráfico apresenta o comportamento médio de cada turbogerador para os dados originais e os resultados da simulação. Como a variação entre os dois resultados é bastante pequena, pode-se concluir que o modelo, apesar da simplicidade, apresenta uma razoável aproximação do comportamento observado no sistema.

Além disso, pelos resultados originais e da simulação este FPSO não pode ser operado nas condições em que ele se encontra com menos de 4 máquinas. Isto porque em média as máquinas ficam em *stand-by* durante menos de 15% do tempo total. Para que fosse possível operar com somente 3 máquinas, o tempo de stand-by deveria ser de pelo menos 25% para cada máquina.

5.2. Experimentações com o modelo validado

Essa seção apresenta as experimentações com o modelo validado na seção 5.1, visando ampliar o conhecimento sobre o comportamento do sistema em determinadas situações. Cada situação é apresentada em um tópico desta seção.

5.2.1. Utilização do mecânico de bordo

O mecânico de bordo é utilizado toda vez que há uma manutenção corretiva e quando a manutenção preventiva apresenta um gasto de homem/hora, conforme apresenta a Tabela 3. Nesse sentido, é possível estimar o tempo de utilização do mecânico de bordo pela soma dos tempos de manutenção corretiva (variáveis vTMC [1,2,3,4]), e pelos gastos de homem/hora com manutenção preventiva (variáveis vMP_Hh [1,2,3,4]).

Atividades que consomem H/h	TG1	TG2	TG3	TG4	Total Geral
vTMC	4.181	2.757	2.603	3.062	12.603
vMP_Hh	2.486	2.486	2.486	2.486	9.944
Horas em manutenção (total)	6.667	5.243	5.089	5.548	22.547
Horas em manutenção (mensal)	52	41	40	44	178

Tabela 19: Utilização do mecânico de bordo.

A Tabela 19 mostra os resultados da utilização do mecânico de bordo. Essas informações permitem estimar que o mecânico gasta 5,93 horas por dia, considerando que ele trabalha 30 dias no mês.

5.2.2. Aumento do Tempo de Simulação

Conforme os requerimentos normativos da indústria do petróleo (ISO e API), os turbogeradores devem apresentar uma vida útil de 20 anos. Sendo assim, nesta seção testa-se o que aconteceria se o tempo da simulação fosse igual a essa vida útil. Para calcular o tempo de 20 anos em horas, fez-se a seguinte consideração: cada ano possui 12 meses, cada mês apresentando 30 dias e cada dia 24 horas. A Tabela 20 apresenta os resultados em termos de tempos para cada conjunto de atividades.

Conjunto de Atividades	TG1	TG2	TG3	TG4
vTMC	7.907	5.183	4.922	5.804
TMP & SB	29.303	24.459	24.395	24.083
Total Geral	37.210	29.642	29.317	29.887

Tabela 20: Resultado da simulação com o tempo de simulação aumentado.

Para se ter um comparativo, uma comparação foi feita entre os dados originais projetados e a simulação de 20 anos, por meio do Gráfico 2. Ele representa o comportamento médio dos turbogeradores ao longo do tempo, em que é possível se perceber que há pouca variação entre os dois resultados. No entanto, existe um aumento do tempo de manutenção preventiva e *stand-by*, se comparado com os resultados do modelo validado no Gráfico 1.

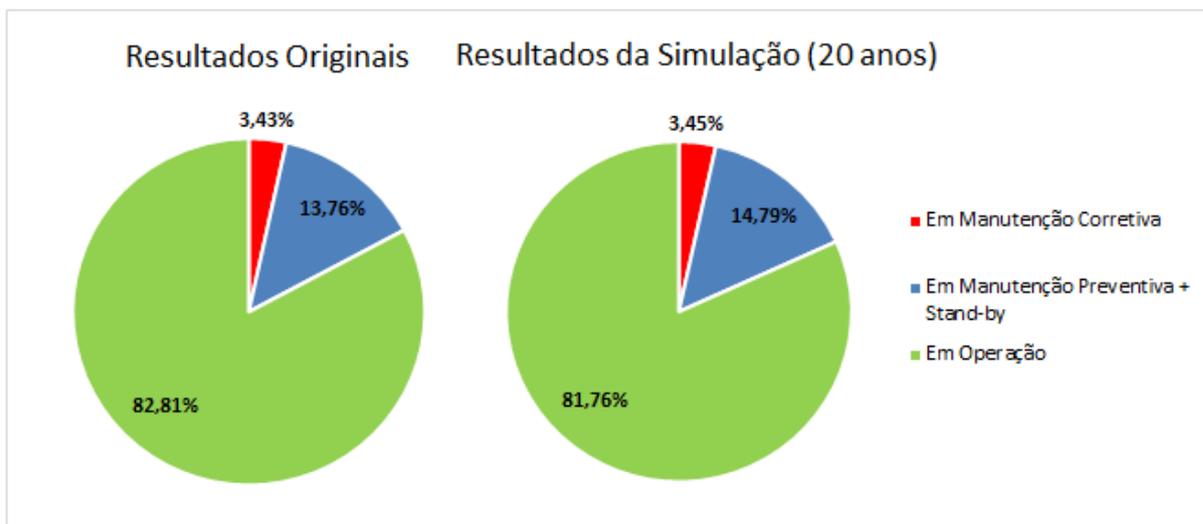


Gráfico 2: Comparação do resultado para o modelo com o tempo de simulação aumentado.

A manutenção corretiva se mantém constante ao ser comparada com o modelo validado na seção 5.1. Isto se deve a não existência de um fator que cause um aumento da necessidade de manutenção das máquinas ao longo do tempo, o que seria um comportamento esperado no sistema real.

5.2.3. Padronização da Distribuições para Manutenção Corretiva

De acordo com FOGLIATTO *et al.* (2011) e NASA(1994), a lognormal é uma distribuição muito utilizada na modelagem de tempos de reparo em unidades reparáveis. Já outros autores sugerem que a distribuição exponencial pode ajustar bem esses tempos, como MENDES (2014) e MANNAN (2014).

No caso, observa-se no APÊNDICE B – Testes de Aderência para Manutenção Corretiva, que a lognormal é rejeitada para todos os turbogeradores e apresenta um *rank* baixo. Por outro lado, o ajuste à distribuição exponencial não é rejeitado por nenhum dos equipamentos, apesar desta apresentar um baixo *rank* em alguns deles. Por conta disso, a utilização da distribuição exponencial foi testada para todas as turbomáquinas, cujo resultado é apresentado na Tabela 21.

Conjunto de Atividades	TG1	TG2	TG3	TG4	Média
Distribuições com melhor ajuste	4.181	2.757	2.603	3.062	3.151
Erro relativo	0,18%	1,28%	0,47%	1,35%	0,82%
Distribuição exponencial	4.190	2.722	2.595	3.044	3.138
Erro relativo	0,38%	-0,01%	0,13%	0,75%	0,31%

Tabela 21: Comparativo entre a simulação validada e a simulação da manutenção corretiva padronizada com a distribuição exponencial.

Surpreendentemente, os resultados para a modelagem da manutenção corretiva com a distribuição exponencial são melhores do que para as distribuições utilizadas no modelo validado, onde o critério de escolha era a distribuição com o maior *rank*. No entanto, ambas apresentam erros relativos médios próximos e abaixo de 1%, representando assim muito bem os dados originais, o que pode ser observado no Gráfico 3.

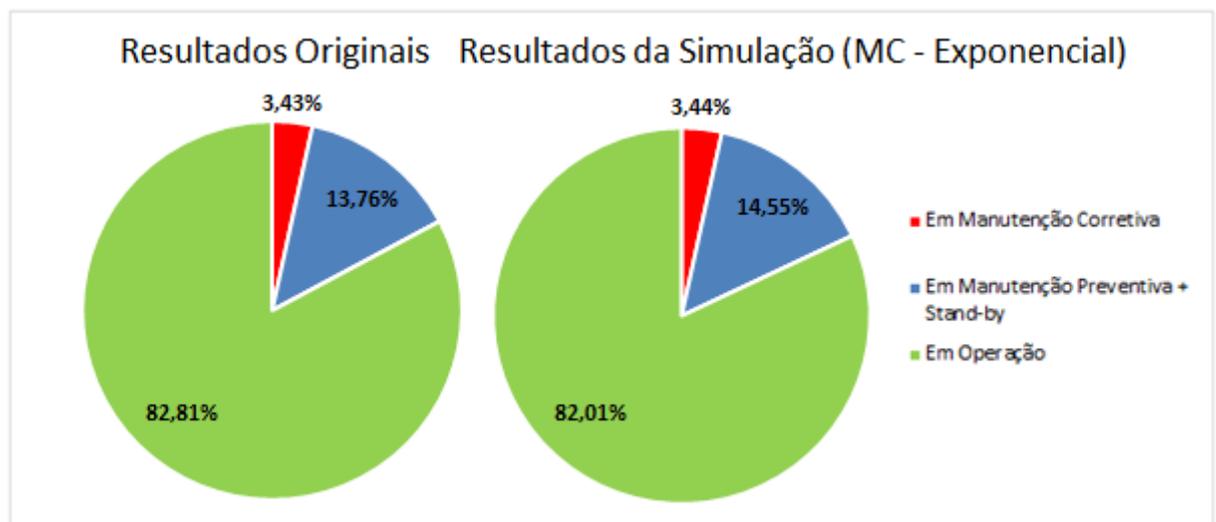


Gráfico 3: Comparação entre os resultados originais e a simulação com a manutenção corretiva padronizada com distribuição exponencial.

5.2.4. Padronização da Distribuições para *stand-by*

No caso dos tempos de stand-by, todas as máquinas foram mais bem modeladas pela distribuição *Gamma*, à exceção do turbogerador 2, cuja distribuição com maior *rank* foi a *Weibull*. Sendo assim, este experimento apresenta o resultado de uma simulação com os tempos de stand-by de todos os turbogeradores sendo modelados pela distribuição *Gamma*.

Tempo de Manutenção Preventiva & Stand-by	TG1	TG2	TG3	TG4	Média
Distribuições originais da simulação validada	15.266	12.694	12.639	12.488	13.272
Erro relativo	4,66%	5,92%	6,31%	6,36%	5,81%
Distribuições Gamma	15.238	12.751	12.680	12.496	13.291
Erro relativo	4,47%	6,40%	6,66%	6,43%	5,99%

Tabela 22: Comparativo entre a simulação validada e a simulação com distribuições de *stand-by* padronizadas.

A Tabela 22 mostra os resultados da simulação para o tempo de manutenção preventiva e *stand-by* na simulação validada e na simulação com a padronização desses tempos pela distribuição *Gamma*. Além disso, ela também mostra o erro relativo de cada uma das duas simulações em relação aos resultados originais.

O erro relativo médio (entre todas as turbinas) é maior quando se utiliza todas as distribuições como *Gamma*. Isto é esperado, já que num dos turbogeradores ela não é a distribuição que melhor ajusta seus dados. No entanto, a diferença é bastante pequena, o que significa que com a padronização das distribuições também se obtém bons resultados.

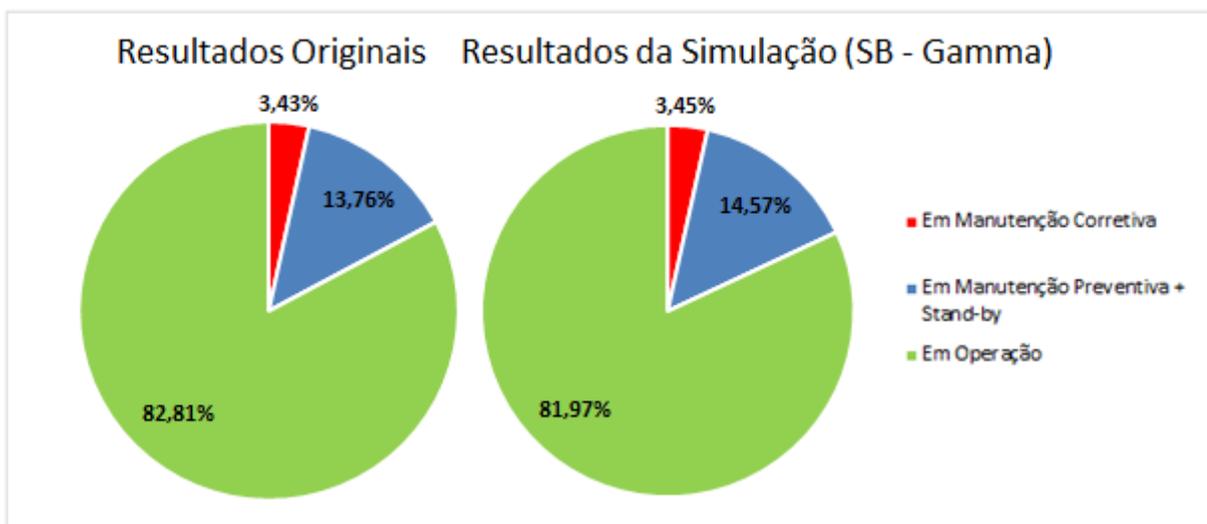


Gráfico 4: Comparação dos resultados originais e da simulação com distribuição *Gamma* para os tempos de *stand-by*.

O Gráfico 4 compara o comportamento médio das turbinas para os resultados originais e para a simulação padronizada por *Gamma* nesta seção. A variação entre os resultados continua sendo pequena de uma forma geral.

5.2.5. Mudança de Amostragem para as Distribuições de *stand-by*

De acordo com a Tabela 7, a amostragem que apresenta o segundo melhor ajuste das distribuições de *stand-by* é a mensal. Sendo assim, esta seção apresenta a experimentação do que aconteceria se esta amostragem fosse utilizada.

Tempo de Manutenção Preventiva & Stand-by	TG1	TG2	TG3	TG4	Média
Distribuições originais da simulação validada	15.266	12.694	12.639	12.488	13.272
Erro relativo	4,66%	5,92%	6,31%	6,36%	5,81%
<i>Stand-by</i> com amostragem mensal	15.594	12.795	12.639	12.096	13.281
Erro relativo	6,91%	6,76%	6,32%	3,02%	5,75%

Tabela 23: Comparativo entre a simulação validada e a simulação com *stand-by* usando amostragem mensal.

A Tabela 23 apresenta os resultados desse experimento e os compara com os resultados da simulação validada. Em média, a amostragem mensal apresenta um erro relativo menor que a simulação original, entretanto, individualmente ela é pior para 3 das 4 máquinas. De forma geral, os resultados do experimento ficaram pouco distantes dos resultados originais, como pode ser observado no Gráfico 5.

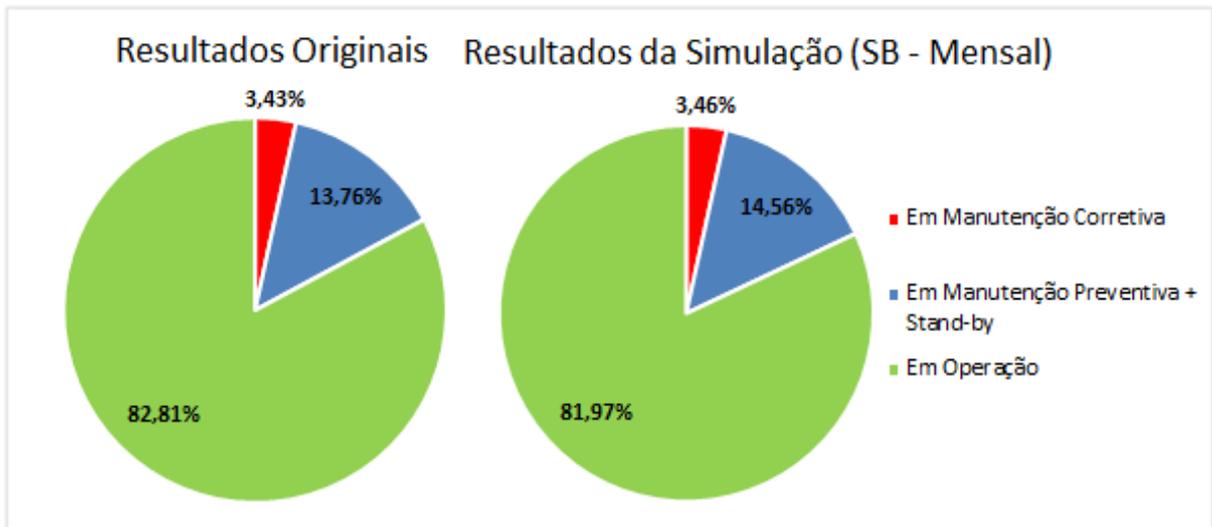


Gráfico 5: Comparação entre os resultados originais e a simulação os tempos de *stand-by* utilizando uma amostragem mensal.

6. CONCLUSÃO

6.1. Críticas ao modelo

A partir do desenvolvimento do modelo e da realização de experimentos com ele, percebeu-se que o modelo apresenta algumas falhas ou limitações. Dois principais fatores que contribuem para isso são: as simplificações/hipóteses adotadas, a falta e inexatidão dos dados de entrada.

Devido à falta de dados de entrada alguns fatores não puderam ser considerados no modelo. Este é o caso das peças e materiais utilizados nas manutenções, bem como seus custos. Tais elementos poderiam agregar informações bastante interessantes ao sistema, que permitiriam avaliar o custo operacional dos turbogeradores, a gestão do estoque de peças e materiais, além da avaliação da qualidade das manutenções por parte dos mecânicos de bordo, por exemplo, relacionadas ao consumo excessivo de materiais/peças. Como um dos focos deste trabalho era identificar como operar o sistema de forma mais eficiente, estes elementos seriam muito úteis, pois são elementos que normalmente apresentam oportunidades de melhoria.

Outros dados que seriam interessantes de se acrescentar ao modelo estariam relacionados à demanda e a produção de energia por parte dos turbogeradores. Isto porque eles permitiriam avaliar a cadeia de eventos que vai desde a falha no turbogerador até a possível geração de um custo de oportunidade relacionado a uma queda na produção de óleo por falta de energia.

Com relação à inexatidão dos dados de entrada, pode-se dizer que ela ajudou a simplificar o modelo. Isto porque uma maior precisão dos dados permitiria uma avaliação mais adequada de quais tempos se relacionam, por exemplo, à manutenção preventiva e quais a *stand-by*.

Além disso, uma maior precisão dos dados permitiria avaliar se é possível modelar cada atividade numa amostragem menor (minutos ou horas), ao invés de meses ou quinzenas. Uma amostragem menor permitiria representar de uma maneira mais realista o sistema, já que as máquinas podem ter diversos tempos de manutenção corretiva ou de *stand-by* ao longo de um mês ou uma quinzena.

No modelo validado, ao invés de representar esses vários tempos ao longo do mês/quinzena (como se fossem realmente eventos ao longo do tempo), no completar de um mês/quinzena sorteava-se a chance de haver ou não falhas (ou *stand-by*) naquele período, e em seguida, no caso de haver falhas ou *stand-by*, sorteava-se o tempo total gasto com essas atividades naquele período. Isto prejudica uma avaliação mais dinâmica do modelo, que

permitiria identificar quantas vezes as máquinas requereram manutenções corretivas ou falharam ao mesmo tempo ou quantas vezes e quando uma máquina entrou ou saiu de *stand-by*.

O modelo apresenta uma boa aderência aos dados do sistema num nível mais macro. No entanto, ele não consegue representa-lo num grau de detalhe que seja suficiente para avaliar o impacto de interferências no mesmo. Por exemplo, ele não é capaz de identificar o impacto de acrescentar uma manutenção preventiva para reduzir a taxa de falhas; quantas vezes ao longo do tempo de simulação houveram máquinas com falhas ao mesmo tempo; ou qual o impacto do Offloading no funcionamento dos turbogeradores; dentre outros. Isto se deve às simplificações adotadas para a realização do modelo, seja por opções do modelador ou devido a limitações do software.

Uma simplificação que certamente gerou uma menor aderência do modelo foi o fato da frequência de ocorrência e dos tempos de manutenção preventiva serem considerados variáveis determinísticas, quando na realidade são estocásticas. Além disso, são vários os fatores que impactam na decisão de realizar uma manutenção preventiva ou não. Um exemplo disso, é que certamente um mecânico de bordo priorizaria realizar uma manutenção corretiva numa máquina A, ao invés de uma preventiva numa máquina B, para evitar que o sistema de geração diminuísse sua produção de energia.

Uma limitação observada nesta utilização do software foi a necessidade de afirmar que o mecânico de bordo consegue atender todas as máquinas sem gerar atrasos, conforme explicado na seção 5.1, o que não necessariamente é verdade. Sem representar adequadamente o atendimento do mecânico e o correto cálculo das manutenções preventivas ao mesmo tempo, certamente a aderência do modelo diminuiu.

Por fim, o modelo não diferencia uma falha de um defeito. Um defeito causa uma queda de desempenho na máquina, sem necessariamente causar uma parada do equipamento, ou seja, uma falha. Nesse sentido, um defeito também requisita uma manutenção que pode ser diferente em termos de frequência e tempo de realização de um caso de falha.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros seria interessante buscar resolver os problemas levantados no item anterior. Primeiramente, a obtenção dos dados acerca dos insumos é bastante importante, junto das informações relacionadas a produção de cada turbogerador e a demanda por energia da unidade ao longo do tempo. Com isso, o modelo já traria mais informações sobre o sistema.

Um passo adiante seria coletar dados mais precisos sobre as atividades de manutenção e stand-by. A partir disso, as chances de conseguir obter distribuições mais aderentes para uma amostragem de um período menor seria maximizada e utilizando de um período de amostragem menor, o modelo poderia apresentar uma granularidade maior de detalhes. Além disso, a determinação e aplicação de regras relacionadas à quando colocar uma máquina em stand-by ou a quando uma máquina efetivamente deve entrar em stand-by complementaria o passo anterior.

Outro ponto interessante seria tentar determinar quais são os parâmetros da manutenção preventiva de forma estocástica. Isto possibilitaria uma comparação com o plano de manutenção sugerido pelo fornecedor de equipamentos, além de trazer uma maior realidade ao modelo. É importante observar que também uma maior complexidade seria atrelada ao modelo após a adição de todos esses elementos.

Por último, não se deve esquecer de buscar contornar as limitações encontradas no ProModel. Isto pode ser feito pela utilização de um código diferente, que contabilize de forma diferente as variáveis e determine uma forma mais real de utilização do mecânico de bordo, ou pela busca de outro software que não limite a criação do modelo computacional. Por meio disto, a interação entre os elementos do modelo seria mais parecida com aquela do sistema estudado.

6.3. Aprendizado

Primeiramente, este projeto permitiu a seu autor o desenvolvimento de sua habilidade de lidar com problemas complexos. A capacidade de compreender um problema complexo, de conseguir modelá-lo e de propor uma solução que seja razoável, além de aderente a realidade, é uma competência essencial a qualquer profissional diferenciado nos dias de hoje.

A respeito do problema estudado, os conhecimentos aplicados e adquiridos de gestão de operações no setor de óleo e gás, manutenção, estatística e simulação reforçaram as habilidades do autor nesses assuntos. Outro ponto importante foi o aprendizado relacionado a utilização de um software de simulação, cuja aplicabilidade na resolução de diversos problemas práticos é bastante alta.

Por fim, ter a oportunidade de lidar com profissionais do ramo e observar as práticas do mercado foram elementos bastante agregadores de conhecimento.

BIBLIOGRAFIA

BAIN & COMPANY, TOZZINIFREIRE ADVOGADOS, 2009, *Estudos de Alternativas Regulatórias, Institucionais e Financeiras para a Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural e para o Desenvolvimento Industrial da Cadeia Produtiva de Petróleo e Gás Natural no Brasil*. Realizado com recursos do Fundo de Estruturação de Projetos do BNDES (FEP).

BANKS, J.; CARSON II, J.; NELSON, B. **Discrete Event Simulation**. 2ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

CLAUSS, G. F. The Conquest of Inner Space - Challenges and Innovations in Offshore Technology. **Marine Systems and Ocean Technology**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, Junho 2007.

FERREIRA FILHO, V. J. M. **Gestão de Operações e Logística na Produção de Petróleo**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, D. . J. L. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

ISO 14224:2006(E). **Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment**. 2ª. ed. Genebra: ISO, 2006.

KELTON, W. D.; SMITH, J. S.; STURROCK, D. T. **Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications**. 3ª. ed. Pittsburgh: Simio LLC, 2013.

MANNAN, S. **Lee's Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier, 2014.

MENDES, A. A. **Uma Contribuição para a Análise da Confiabilidade de Sistemas Redundantes com Inspeção Periódica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life**. 1ª. ed. Princeton: Princeton University Press, 2007.

MITRA, N. K. **Fundamentals of Floating Production Systems**. 1ª. ed. New Delhi: Allied Publishers Private Limited, 2009.

MONIÉ, F.; BINSZTOK, J. **Geografia e Geopolítica do Petróleo**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Mauad, 2012.

NASA, [1994]. **Mean Time do Repair Predictions**. Disponível em: <<http://lis.nasa.gov/lesson/840>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

PERERA, L. P. et al. Modelling of System Failures in Gas Turbine Engines on Offshore Platforms. **IFAC-Oilfield 2015**. Florianópolis, maio 2015, p. 200-205.

PIQUET, R.; SERRA, R. V. **Petróleo e região no Brasil: o desafio da abundância**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Garamound, 2007.

PROMODEL CORPORATION. **ProModel User Guide**, 9.1: ProModel Corporation, 2014.

PROMODEL CORPORATION. ProModel. **ProModel**, 2015. Disponível em: <<https://www.promodel.com/Products/ProModel/>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

RODRIGUES, M. V. **Entendendo, aprendendo e desenvolvendo sistemas de produção Lean Manufacturing**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SHANNON, R. E. Introduction do The Art and Science of Simulation. **Winter Simulation Conference**, Texas, 1998.

APÊNDICE A – Testes de Aderência para *stand-by*

AMOSTRAGEM POR MINUTO

distribution	TG1	rank	acceptance	distribution	TG3	rank	acceptance
LogLogistic(0., 1.95, 20.8)		100	do not reject	Weibull(0., 1.25, 30.8)		33.1	reject
Gamma(0., 1.53, 18.4)		12.7	reject	LogLogistic(0., 1.82, 21.5)		30.6	reject
Beta(0., 2.62e+004, 1.53, 1.42e+003)		12.7	reject	Beta(0., 155, 1.17, 5.17)		9.11	reject
Pearson 6(0., 85., 1.88, 6.59)		10.7	reject	Gamma(0., 1.39, 20.6)		7.32	reject
Weibull(0., 1.27, 30.5)		2.39	reject	Pearson 6(0., 3.81e+003, 1.44, 195)		6.37	reject
Lognormal(0., 2.98, 0.963)		7.93e-004	reject	Exponential(0., 28.7)		0.	reject
Exponential(0., 28.2)		0.	reject	Lognormal(0., 2.96, 1.11)		0.	reject
Uniform(0., 99.5)		0.	reject	Uniform(0., 99.2)		0.	reject
Inverse Gaussian(0., 14., 28.2)		0.	reject	Inverse Gaussian(0., 4.34, 28.7)		0.	reject
Erlang(0., 2., 14.1)		0.	reject	Erlang(0., 1., 28.7)		0.	reject
Triangular(0., 102, 0.609)		0.	reject	Triangular(0., 101, 0.)		0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.789, 8.62e-002)		0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.591, 9.76e-002)		0.	reject
Pearson 5(0., 0.8, 7.49)		0.	reject	Pearson 5(0., 0.403, 1.52)		0.	reject
Power Function(0., 99.5, 0.616)		0.	reject	Power Function(0., 99.2, 0.61)		0.	reject
Rayleigh(0., 25.7)		0.	reject	Rayleigh(0., 25.8)		0.	reject
Chi Squared(0., 20.6)		0.	reject	Chi Squared(0., 20.2)		0.	reject
Pareto		no fit	reject	Pareto		no fit	reject
Johnson SB		no fit	reject	Johnson SB		no fit	reject
distribution	TG2	rank	acceptance	distribution	TG4	rank	acceptance
Weibull(0., 1.28, 31.6)		31.5	reject	LogLogistic(0., 1.84, 20.)		29.8	do not reject
LogLogistic(0., 1.83, 22.6)		6.99	reject	Weibull(0., 1.25, 28.7)		18.6	reject
Beta(0., 133, 1.14, 4.03)		3.32	reject	Gamma(0., 1.41, 19.)		8.59	reject
Pearson 6(0., 1.19e+004, 1.4, 563)		2.82	reject	Pearson 6(0., 2.74e+003, 1.45, 152)		7.99	reject
Gamma(0., 1.41, 20.9)		2.4	reject	Beta(0., 205, 1.25, 8.33)		7.24	reject
Exponential(0., 29.4)		0.	reject	Exponential(0., 26.8)		0.	reject
Lognormal(0., 2.99, 1.13)		0.	reject	Lognormal(0., 2.89, 1.09)		0.	reject
Uniform(0., 98.9)		0.	reject	Uniform(0., 98.)		0.	reject
Inverse Gaussian(0., 4.09, 29.4)		0.	reject	Inverse Gaussian(0., 4.18, 26.8)		0.	reject
Erlang(0., 1., 29.4)		0.	reject	Erlang(0., 1., 26.8)		0.	reject
Triangular(0., 101, 0.)		0.	reject	Triangular(0., 99.2, 0.)		0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.578, 9.68e-002)		0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.595, 0.103)		0.	reject
Pearson 5(0., 0.387, 1.39)		0.	reject	Pearson 5(0., 0.409, 1.48)		0.	reject
Power Function(0., 98.9, 0.622)		0.	reject	Power Function(0., 98.1, 0.59)		0.	reject
Rayleigh(0., 26.1)		0.	reject	Rayleigh(0., 24.2)		0.	reject
Chi Squared(0., 20.8)		0.	reject	Chi Squared(0., 19.)		0.	reject
Pareto		no fit	reject	Pareto		no fit	reject
Johnson SB		no fit	reject	Johnson SB		no fit	reject

AMOSTRAGEM POR HORA

distribution	TG1	rank	acceptance	distribution	TG3	rank	acceptance
LogLogistic(0., 1.49, 28.9)		100	do not reject	LogLogistic(0., 1.5, 28.7)		100	do not reject
Pearson 6(0., 91., 1.32, 3.29)		28.6	do not reject	Pearson 6(0., 383, 1.04, 9.12)		4.17	reject
Johnson SB(0., 1.35e+003, 3.07, 0.8)		0.837	reject	Gamma(0., 0.936, 52.8)		0.777	reject
Lognormal(0., 3.33, 1.21)		0.557	reject	Weibull(0., 0.93, 47.7)		0.184	reject
Weibull(0., 0.929, 49.7)		2.27e-002	reject	Exponential(0., 49.4)		0.162	reject
Gamma(0., 0.944, 54.7)		9.54e-004	reject	Erlang(0., 1., 49.4)		0.161	reject
Exponential(0., 51.6)		9.69e-005	reject	Beta(0., 885, 0.872, 14.5)		4.84e-002	reject
Erlang(0., 1., 51.6)		9.51e-005	reject	Lognormal(0., 3.28, 1.29)		3.29e-004	reject
Beta(0., 490, 0.815, 6.62)		0.	reject	Uniform(0., 458)		0.	reject
Uniform(0., 368)		0.	reject	Inverse Gaussian(0., 4.33, 49.4)		0.	reject
Inverse Gaussian(0., 12.7, 51.6)		0.	reject	Triangular(0., 459, 0.)		0.	reject
Triangular(0., 369, 0.)		0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.555, 7.64e-002)		0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.699, 6.78e-002)		0.	reject	Pearson 5(0., 0.354, 1.41)		0.	reject
Pearson 5(0., 0.611, 6.22)		0.	reject	Power Function(0., 500, 0.341)		0.	reject
Rayleigh(0., 56.7)		0.	reject	Rayleigh(0., 55.1)		0.	reject
Chi Squared(0., 28.9)		0.	reject	Chi Squared(0., 27.5)		0.	reject
Power Function(0., 369, 0.387)		0.	reject	Pareto		no fit	reject
Pareto		no fit	reject	Johnson SB		no fit	reject
distribution	TG2	rank	acceptance	distribution	TG4	rank	acceptance
LogLogistic(0., 1.43, 30.2)		100	reject	LogLogistic(0., 1.48, 27.3)		100	do not reject
Pearson 6(0., 99.9, 1.19, 3.18)		6.49	reject	Pearson 6(0., 94.4, 1.24, 3.39)		27.	do not reject
Weibull(0., 0.883, 51.1)		7.24e-002	reject	Weibull(0., 0.92, 46.4)		2.43e-002	reject
Gamma(0., 0.86, 63.6)		5.89e-002	reject	Lognormal(0., 3.25, 1.27)		2.e-002	reject
Erlang(0., 1., 54.7)		2.86e-004	reject	Gamma(0., 0.922, 52.5)		1.89e-003	reject
Exponential(0., 54.7)		2.84e-004	reject	Erlang(0., 1., 48.4)		1.66e-004	reject
Beta(0., 4.14e+003, 0.631, 33.6)		0.	reject	Exponential(0., 48.4)		1.65e-004	reject
Lognormal(0., 3.32, 1.36)		0.	reject	Beta(0., 426, 0.79, 5.82)		0.	reject
Uniform(0., 639)		0.	reject	Uniform(0., 324)		0.	reject
Inverse Gaussian(0., 3.96, 54.7)		0.	reject	Inverse Gaussian(0., 4.99, 48.4)		0.	reject
Triangular(0., 641, 0.)		0.	reject	Triangular(0., 325, 0.)		0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.536, 7.65e-002)		0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.58, 7.67e-002)		0.	reject
Pearson 5(0., 0.336, 1.24)		0.	reject	Pearson 5(0., 0.382, 1.73)		0.	reject
Power Function(0., 2.e+003, 0.233)		0.	reject	Power Function(0., 324, 0.395)		0.	reject
Rayleigh(0., 63.6)		0.	reject	Rayleigh(0., 53.5)		0.	reject
Chi Squared(0., 28.6)		0.	reject	Chi Squared(0., 26.7)		0.	reject
Pareto		no fit	reject	Pareto		no fit	reject
Johnson SB		no fit	reject	Johnson SB		no fit	reject

AMOSTRAGEM DIÁRIA

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Gamma[0., 1.69, 19.1]	86.2	do not reject	Erlang[0., 2., 16.3]	90.5	do not reject
LogLogistic[0., 2.05, 24.8]	75.6	do not reject	LogLogistic[0., 2.09, 25.9]	55.3	do not reject
Erlang[0., 2., 16.1]	28.6	do not reject	Pearson 6[0., 5.75e+003, 1.83, 327]	49.8	do not reject
Weibull[0., 1.37, 35.2]	27.8	do not reject	Weibull[0., 1.43, 35.8]	30.	do not reject
Pearson 6[0., 97.5, 1.96, 6.81]	21.8	do not reject	Gamma[0., 1.74, 18.7]	20.5	reject
Lognormal[0., 3.15, 0.925]	0.13	reject	Beta[0., 147, 1.4, 4.89]	5.77	reject
Beta[0., 113, 1.17, 2.83]	7.59e-003	reject	Johnson SB[0., 106, 0.796, 0.755]	3.99e-002	reject
Exponential[0., 32.2]	0.	reject	Triangular[0., 103, 0.]	1.59e-003	reject
Uniform[0., 113]	0.	reject	Exponential[0., 32.6]	0.	reject
Inverse Gaussian[0., 17.5, 32.2]	0.	reject	Uniform[0., 99.2]	0.	reject
Triangular[0., 114, 0.553]	0.	reject	Inverse Gaussian[0., 5.17, 32.6]	0.	reject
Inverse Weibull[0., 0.795, 7.16e-002]	0.	reject	Lognormal[0., 3.17, 0.971]	0.	reject
Pearson 5[0., 0.821, 9.3]	0.	reject	Inverse Weibull[0., 0.601, 7.37e-002]	0.	reject
Power Function[0., 113, 0.633]	0.	reject	Pearson 5[0., 0.394, 1.76]	0.	reject
Rayleigh[0., 28.4]	0.	reject	Rayleigh[0., 28.2]	0.	reject
Chi Squared[0., 24.3]	0.	reject	Chi Squared[0., 24.8]	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Power Function[0., 99.2, 0.701]	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject	Pareto	no fit	reject

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Erlang[0., 2., 16.]	100	do not reject	Erlang[0., 2., 14.8]	67.4	do not reject
Weibull[0., 1.4, 34.9]	10.8	do not reject	LogLogistic[0., 2.05, 23.3]	66.2	do not reject
LogLogistic[0., 2.03, 25.4]	6.37	reject	Pearson 6[0., 2.16e+003, 1.72, 128]	18.3	do not reject
Gamma[0., 1.64, 19.5]	3.15	reject	Weibull[0., 1.38, 32.4]	17.7	do not reject
Pearson 6[0., 3.47e+004, 1.63, 1.77e+003]	2.57	reject	Gamma[0., 1.66, 17.8]	17.5	reject
Beta[0., 114, 1.2, 3.07]	0.314	reject	Beta[0., 188, 1.44, 7.68]	8.33	reject
Triangular[0., 102, 0.]	1.3e-004	reject	Exponential[0., 29.7]	0.	reject
Exponential[0., 31.9]	0.	reject	Lognormal[0., 3.06, 0.985]	0.	reject
Uniform[0., 98.9]	0.	reject	Uniform[0., 98.]	0.	reject
Inverse Gaussian[0., 4.64, 31.9]	0.	reject	Inverse Gaussian[0., 5.32, 29.7]	0.	reject
Lognormal[0., 3.13, 1.03]	0.	reject	Triangular[0., 100, 0.]	0.	reject
Inverse Weibull[0., 0.586, 7.98e-002]	0.	reject	Inverse Weibull[0., 0.615, 8.23e-002]	0.	reject
Pearson 5[0., 0.383, 1.55]	0.	reject	Pearson 5[0., 0.42, 1.9]	0.	reject
Power Function[0., 98.9, 0.682]	0.	reject	Power Function[0., 98., 0.656]	0.	reject
Rayleigh[0., 27.7]	0.	reject	Rayleigh[0., 26.]	0.	reject
Chi Squared[0., 23.8]	0.	reject	Chi Squared[0., 22.3]	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject

AMOSTRAGEM QUINZENAL

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Gamma[0., 1.46, 49.1]	85.2	do not reject	Gamma[0., 1.52, 41.1]	100	do not reject
Weibull[0., 1.25, 77.2]	80.4	do not reject	Johnson SB[0., 249, 1.11, 0.787]	87.8	do not reject
Beta[0., 1.49e+003, 1.37, 26.4]	77.1	do not reject	Weibull[0., 1.31, 67.7]	78.3	do not reject
Pearson 6[0., 254, 1.62, 6.6]	20.	do not reject	Pearson 6[0., 545, 1.48, 13.8]	65.8	do not reject
LogLogistic[0., 1.82, 52.4]	4.66	do not reject	Beta[0., 252, 1.15, 3.42]	32.5	do not reject
Lognormal[0., 3.89, 0.98]	2.29	do not reject	LogLogistic[0., 1.87, 46.9]	18.4	do not reject
Exponential[0., 71.8]	0.145	reject	Lognormal[0., 3.77, 0.989]	6.02	do not reject
Erlang[0., 2., 35.9]	4.99e-002	reject	Erlang[0., 2., 31.3]	1.81	do not reject
Uniform[0., 338]	0.	reject	Exponential[0., 62.5]	4.43e-002	reject
Inverse Gaussian[0., 33.3, 71.8]	0.	reject	Uniform[0., 229]	0.	reject
Triangular[0., 341, 0.]	0.	reject	Inverse Gaussian[0., 25.4, 62.5]	0.	reject
Inverse Weibull[0., 0.778, 3.44e-002]	0.	reject	Triangular[0., 232, 0.]	0.	reject
Pearson 5[0., 0.775, 17.6]	0.	reject	Inverse Weibull[0., 0.736, 3.96e-002]	0.	reject
Johnson SB[0., 207, 0.709, 0.714]	0.	reject	Pearson 5[0., 0.69, 12.5]	0.	reject
Rayleigh[0., 65.7]	0.	reject	Rayleigh[0., 55.7]	0.	reject
Chi Squared[0., 50.1]	0.	reject	Chi Squared[0., 44.5]	0.	reject
Power Function[0., 345, 0.513]	0.	reject	Power Function[0., 233, 0.595]	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Weibull[0., 1.35, 71.]	100	do not reject	Gamma[0., 1.37, 45.1]	97.1	do not reject
Beta[0., 740, 1.59, 16.8]	80.4	do not reject	Weibull[0., 1.21, 66.1]	89.3	do not reject
Gamma[0., 1.61, 40.6]	71.6	do not reject	Pearson 6[0., 723, 1.56, 19.8]	41.8	do not reject
Johnson SB[0., 305, 1.38, 0.851]	25.3	do not reject	LogLogistic[0., 1.76, 44.1]	24.7	do not reject
Pearson 6[0., 594, 1.56, 15.1]	20.1	do not reject	Lognormal[0., 3.72, 1.02]	14.3	do not reject
Erlang[0., 2., 32.6]	11.8	do not reject	Erlang[0., 1., 62.]	1.45	do not reject
LogLogistic[0., 1.92, 50.3]	6.27	do not reject	Exponential[0., 62.]	1.45	do not reject
Lognormal[0., 3.83, 0.963]	0.449	do not reject	Beta[0., 3.32e+004, 1.79, 848]	4.23e-004	reject
Exponential[0., 65.1]	2.52e-002	reject	Uniform[0., 334]	0.	reject
Uniform[0., 271]	0.	reject	Inverse Gaussian[0., 27.9, 62.]	0.	reject
Inverse Gaussian[0., 25.4, 65.1]	0.	reject	Triangular[0., 336, 0.]	0.	reject
Triangular[0., 274, 0.]	0.	reject	Inverse Weibull[0., 0.784, 4.18e-002]	0.	reject
Inverse Weibull[0., 0.722, 3.68e-002]	0.	reject	Pearson 5[0., 0.78, 15.]	0.	reject
Pearson 5[0., 0.657, 12.]	0.	reject	Johnson SB[0., 183, 0.733, 0.694]	0.	reject
Rayleigh[0., 57.5]	0.	reject	Rayleigh[0., 57.3]	0.	reject
Chi Squared[0., 47.2]	0.	reject	Chi Squared[0., 42.3]	0.	reject
Power Function[0., 274, 0.563]	0.	reject	Power Function[0., 511, 0.398]	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject

AMOSTRAGEM MENSAL

distribution	TG1	rank	acceptance	distribution	TG3	rank	acceptance
Weibull(9., 1.29, 121)		99.9	do not reject	Beta(3., 402, 1.19, 3.7)		61.8	do not reject
Pearson 6(9., 1.39e+004, 1.32, 155)		85.3	do not reject	Triangular(3., 327, 3.)		32.3	do not reject
Beta(9., 488, 1.15, 3.71)		85.1	do not reject	Weibull(3., 1.35, 107)		30.	do not reject
Gamma(9., 1.47, 76.3)		79.5	do not reject	Erlang(3., 2., 49.2)		8.52	do not reject
Johnson SB(9., 420, 0.994, 0.752)		70.1	do not reject	Johnson SB(3., 329, 0.825, 0.706)		8.08	do not reject
LogLogistic(9., 1.82, 84.7)		15.5	do not reject	Gamma(3., 1.46, 67.5)		5.08	do not reject
Erlang(9., 2., 56.2)		3.17	do not reject	Pearson 6(3., 5.09e+003, 1.37, 71.9)		2.35	reject
Lognormal(9., 4.35, 1.02)		2.81	do not reject	LogLogistic(3., 1.78, 77.6)		1.43	reject
Exponential(9., 112)		1.18	do not reject	Exponential(3., 98.4)		3.51e-002	reject
Triangular(9., 404, 9.)		3.79e-002	reject	Lognormal(3., 4.21, 1.1)		1.3e-002	reject
Pareto(9., 0.43)		0.	reject	Pareto(3., 0.312)		0.	reject
Inverse Gaussian(9., 45.7, 112)		0.	reject	Inverse Gaussian(3., 27., 98.4)		0.	reject
Uniform(9., 394)		0.	reject	Uniform(3., 320)		0.	reject
Pearson 5(9., 0.699, 22.7)		0.	reject	Pearson 5(3., 0.543, 11.5)		0.	reject
Rayleigh(9., 100)		0.	reject	Rayleigh(3., 84.6)		0.	reject
Inverse Weibull(9., 0.741, 2.27e-002)		0.	reject	Inverse Weibull(3., 0.655, 2.78e-002)		0.	reject
Chi Squared(9., 78.2)		0.	reject	Chi Squared(3., 68.2)		0.	reject
Power Function(9., 399, 0.617)		0.	reject	Power Function(3., 329, 0.634)		0.	reject
distribution	TG2	rank	acceptance	distribution	TG4	rank	acceptance
Weibull(0., 1.4, 109)		84.8	do not reject	Beta(4., 467, 1.08, 4.35)		85.7	do not reject
Beta(0., 503, 1.34, 5.42)		74.5	do not reject	Weibull(4., 1.18, 102)		79.4	do not reject
Erlang(0., 2., 50.1)		49.1	do not reject	Gamma(4., 1.21, 80.4)		53.	do not reject
Gamma(0., 1.57, 63.9)		17.1	do not reject	Pearson 6(4., 1.3e+004, 1.22, 166)		40.1	do not reject
Pearson 6(0., 3.11e+004, 1.6, 504)		12.8	do not reject	Exponential(4., 97.2)		9.56	do not reject
LogLogistic(0., 1.9, 80.8)		6.04	do not reject	Erlang(4., 1., 97.2)		9.53	do not reject
Triangular(0., 339, 0.)		0.482	reject	LogLogistic(4., 1.58, 70.5)		3.56	do not reject
Lognormal(0., 4.26, 1.06)		2.22e-002	reject	Lognormal(4., 4.11, 1.23)		0.238	do not reject
Rayleigh(0., 85.9)		1.4e-002	reject	Pareto(4., 0.349)		0.	reject
Exponential(0., 100)		5.87e-003	reject	Inverse Gaussian(4., 14.3, 97.2)		0.	reject
Uniform(0., 332)		0.	reject	Triangular(4., 473, 4.)		0.	reject
Inverse Gaussian(0., 20.7, 100)		0.	reject	Uniform(4., 467)		0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.615, 2.62e-002)		0.	reject	Pearson 5(4., 0.412, 5.14)		0.	reject
Pearson 5(0., 0.456, 7.83)		0.	reject	Johnson SB(4., 246, 0.491, 0.587)		0.	reject
Power Function(0., 341, 0.635)		0.	reject	Rayleigh(4., 87.9)		0.	reject
Chi Squared(0., 71.6)		0.	reject	Inverse Weibull(4., 0.579, 3.29e-002)		0.	reject
Pareto		no fit	reject	Chi Squared(4., 61.9)		0.	reject
Johnson SB		no fit	reject	Power Function(4., 956, 0.364)		0.	reject

APÊNDICE B – Testes de Aderência para Manutenção Corretiva

AMOSTRAGEM POR MINUTO

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 151, 0.667, 6.44)	0.	reject	Beta(0., 380, 0.635, 16.3)	0.	reject
Erlang(0., 1., 13.9)	0.	reject	Erlang(0., 1., 12.4)	0.	reject
Exponential(0., 13.9)	0.	reject	Exponential(0., 12.4)	0.	reject
Gamma(0., 0.738, 18.9)	0.	reject	Gamma(0., 0.741, 16.7)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 1.02, 13.9)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 0.761, 12.4)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.12, 8.25)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.07, 7.7)	0.	reject
Lognormal(0., 1.82, 1.69)	0.	reject	Lognormal(0., 1.71, 1.76)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Pearson 5(0., 0.357, 0.338)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.332, 0.238)	0.	reject
Pearson 6(0., 787, 0.745, 42.7)	0.	reject	Pearson 6(0., 4.86e+003, 0.747, 294)	0.	reject
Triangular(0., 100, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 89.3, 0.)	0.	reject
Uniform(0., 99.6)	0.	reject	Uniform(0., 88.7)	0.	reject
Weibull(0., 0.842, 12.8)	0.	reject	Weibull(0., 0.864, 11.7)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
Rayleigh(0., 15.1)	0.	reject	Rayleigh(0., 12.6)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.506, 0.41)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.481, 0.479)	0.	reject
Chi Squared(0., 7.14)	0.	reject	Chi Squared(0., 6.49)	0.	reject
Power Function(0., 99.9, 0.359)	0.	reject	Power Function(0., 89.8, 0.359)	0.	reject
distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 86.5, 0.746, 4.51)	0.	reject	Beta(0., 114, 0.607, 4.24)	0.	reject
Erlang(0., 1., 12.6)	0.	reject	Erlang(0., 1., 13.8)	0.	reject
Exponential(0., 12.6)	0.	reject	Exponential(0., 13.8)	0.	reject
Gamma(0., 0.825, 15.3)	0.	reject	Gamma(0., 0.691, 20.)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 1.14, 12.6)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 0.988, 13.8)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.18, 8.24)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.06, 7.39)	0.	reject
Lognormal(0., 1.82, 1.61)	0.	reject	Lognormal(0., 1.75, 1.71)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Pearson 5(0., 0.376, 0.395)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.365, 0.337)	0.	reject
Pearson 6(0., 5.26e+003, 0.82, 343)	0.	reject	Pearson 6(0., 968, 0.697, 49.4)	0.	reject
Triangular(0., 87., 0.)	0.	reject	Triangular(0., 84.9, 0.)	0.	reject
Uniform(0., 86.5)	0.	reject	Uniform(0., 83.6)	0.	reject
Weibull(0., 0.929, 12.2)	0.	reject	Weibull(0., 0.799, 12.3)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
Rayleigh(0., 12.4)	0.	reject	Rayleigh(0., 15.1)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.522, 0.396)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.513, 0.439)	0.	reject
Chi Squared(0., 7.13)	0.	reject	Chi Squared(0., 6.72)	0.	reject
Power Function(0., 91.6, 0.37)	0.	reject	Power Function(0., 83.6, 0.373)	0.	reject

AMOSTRAGEM POR HORA

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 711, 0.498, 12.7)	0.	reject	Beta(0., 879, 0.537, 21.9)	0.	reject
Erlang(0., 1., 25.1)	0.	reject	Erlang(0., 1., 19.6)	0.	reject
Exponential(0., 25.1)	0.	reject	Exponential(0., 19.6)	0.	reject
Gamma(0., 0.536, 46.9)	0.	reject	Gamma(0., 0.577, 33.9)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 1.36, 25.1)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 0.887, 19.6)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.02, 9.56)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.06, 8.72)	0.	reject
Lognormal(0., 2.05, 1.8)	0.	reject	Lognormal(0., 1.9, 1.79)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Pearson 5(0., 0.37, 0.477)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.33, 0.28)	0.	reject
Pearson 6(0., 45.8, 0.727, 2.35)	0.	reject	Pearson 6(0., 58.3, 0.741, 3.38)	0.	reject
Triangular(0., 442, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 537, 0.)	0.	reject
Uniform(0., 440)	0.	reject	Uniform(0., 535)	0.	reject
Weibull(0., 0.659, 17.9)	0.	reject	Weibull(0., 0.696, 14.8)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
Rayleigh(0., 40.6)	0.	reject	Rayleigh(0., 35.9)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.509, 0.335)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.482, 0.397)	0.	reject
Chi Squared(0., 8.76)	0.	reject	Chi Squared(0., 7.63)	0.	reject
Power Function(0., 441, 0.248)	0.	reject	Power Function(0., 535, 0.228)	0.	reject
distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 895, 0.413, 8.88)	0.	reject	Gamma(0., 0.586, 33.8)	77.1	reject
Erlang(0., 1., 34.)	0.	reject	Weibull(0., 0.699, 15.2)	7.83	reject
Exponential(0., 34.)	0.	reject	Pearson 6(0., 55.1, 0.737, 3.1)	1.05	reject
Gamma(0., 0.465, 73.1)	0.	reject	Exponential(0., 19.8)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 1.31, 34.)	0.	reject	Beta(0., 1.11e+003, 0.339, 6.86)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.05, 9.8)	0.	reject	Erlang(0., 1., 19.8)	0.	reject
Lognormal(0., 2.14, 1.79)	0.	reject	Lognormal(0., 1.93, 1.73)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Uniform(0., 411)	0.	reject
Pearson 5(0., 0.352, 0.446)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 1.15, 19.8)	0.	reject
Pearson 6(0., 21.7, 0.835, 1.5)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.05, 8.37)	0.	reject
Triangular(0., 712, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 413, 0.)	0.	reject
Uniform(0., 708)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.516, 0.365)	0.	reject
Weibull(0., 0.601, 20.1)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.362, 0.394)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject	Power Function(0., 411, 0.245)	0.	reject
Rayleigh(0., 64.7)	0.	reject	Rayleigh(0., 30.8)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.506, 0.3)	0.	reject	Chi Squared(0., 7.85)	0.	reject
Chi Squared(0., 9.51)	0.	reject	Pareto	no fit	reject
Power Function(0., 1.16e+003, 0.204)	0.	reject	Johnson SB	no fit	reject

AMOSTRAGEM DIÁRIA

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 126, 0.643, 3.23)	8.75	reject	Beta(0., 194, 0.682, 6.95)	1.01	reject
Pearson 6(0., 2.11e+003, 0.734, 74.6)	0.151	reject	Gamma(0., 0.714, 24.9)	0.124	reject
Gamma(0., 0.755, 27.1)	0.117	reject	Pearson 6(0., 2.3e+004, 0.705, 913)	9.28e-002	reject
Weibull(0., 0.853, 19.)	5.37e-002	reject	Weibull(0., 0.838, 16.4)	8.85e-002	reject
Exponential(0., 20.5)	0.	reject	Exponential(0., 17.7)	0.	reject
Erlang(0., 1., 20.5)	0.	reject	Erlang(0., 1., 17.7)	0.	reject
Lognormal(0., 2.23, 1.63)	0.	reject	Lognormal(0., 2.03, 1.81)	0.	reject
Uniform(0., 99.6)	0.	reject	Uniform(0., 101)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 1.83, 20.5)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 0.832, 17.7)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.14, 11.8)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.06, 10.5)	0.	reject
Triangular(0., 101, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 102, 0.)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.528, 0.264)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.46, 0.357)	0.	reject
Pearson 5(0., 0.387, 0.649)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.304, 0.242)	0.	reject
Power Function(0., 99.7, 0.421)	0.	reject	Power Function(0., 109, 0.376)	0.	reject
Rayleigh(0., 21.1)	0.	reject	Rayleigh(0., 17.8)	0.	reject
Chi Squared(0., 10.2)	0.	reject	Chi Squared(0., 8.61)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
TG1			TG3		
distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 167, 0.939, 7.85)	100	reject	Beta(0., 100, 0.581, 2.39)	26.7	reject
Weibull(0., 1.06, 18.3)	63.1	reject	Erlang(0., 1., 18.8)	4.1	reject
Pearson 6(0., 2.46e+003, 1.04, 143)	10.3	reject	Exponential(0., 18.8)	4.1	reject
Gamma(0., 1.02, 17.5)	10.	reject	Pearson 6(0., 1.27e+003, 0.688, 46.1)	0.877	reject
Erlang(0., 1., 17.9)	5.59	reject	Gamma(0., 0.711, 26.4)	0.725	reject
Exponential(0., 17.9)	5.56	reject	Weibull(0., 0.815, 16.9)	0.233	reject
Lognormal(0., 2.32, 1.38)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.09, 10.1)	1.43e-003	reject
Uniform(0., 86.5)	0.	reject	Lognormal(0., 2.08, 1.69)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 2.7, 17.9)	0.	reject	Uniform(0., 88.)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.46, 12.8)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 1.16, 18.8)	0.	reject
Triangular(0., 87.8, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 89.7, 0.)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.576, 0.213)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.5, 0.313)	0.	reject
Pearson 5(0., 0.441, 1.03)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.339, 0.371)	0.	reject
Power Function(0., 86.5, 0.468)	0.	reject	Power Function(0., 88.3, 0.417)	0.	reject
Rayleigh(0., 17.)	0.	reject	Rayleigh(0., 19.7)	0.	reject
Chi Squared(0., 11.2)	0.	reject	Chi Squared(0., 9.01)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
TG2			TG4		

AMOSTRAGEM QUINZENAL

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 285, 0.591, 3.93)	78.4	reject	Exponential(0., 28.4)	79.7	reject
Gamma(0., 0.672, 53.7)	49.	reject	Erlang(0., 1., 28.4)	78.8	reject
Pearson 6(0., 3.11e+003, 0.694, 62.2)	43.8	reject	Beta(0., 349, 0.701, 7.8)	0.	reject
Weibull(0., 0.778, 31.5)	25.4	reject	Gamma(0., 0.759, 37.4)	0.	reject
Exponential(0., 36.1)	1.23	reject	Inverse Gaussian(0., 0.928, 28.4)	0.	reject
Erlang(0., 1., 36.1)	1.23	reject	LogLogistic(0., 1.2, 17.1)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.08, 18.2)	1.17	reject	Lognormal(0., 2.56, 1.73)	0.	reject
Lognormal(0., 2.68, 1.73)	5.54e-004	reject	Uniform(0., 198)	0.	reject
Uniform(0., 215)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.264, 0.237)	0.	reject
Inverse Gaussian(0., 2.28, 36.1)	0.	reject	Pearson 6(0., 1.78e+003, 0.768, 49.2)	0.	reject
Triangular(0., 218, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 200, 0.)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.498, 0.175)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.436, 0.207)	0.	reject
Pearson 5(0., 0.35, 0.751)	0.	reject	Weibull(0., 0.858, 26.4)	0.	reject
Power Function(0., 215, 0.372)	0.	reject	Power Function(0., 214, 0.356)	0.	reject
Rayleigh(0., 39.9)	0.	reject	Rayleigh(0., 30.7)	0.	reject
Chi Squared(0., 15.6)	0.	reject	Chi Squared(0., 13.9)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
TG1			TG3		
distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta(0., 194, 0.639, 3.73)	41.9	reject	Beta(0., 147, 0.635, 2.6)	81.2	do not reject
Exponential(0., 28.2)	14.6	do not reject	Gamma(0., 0.739, 40.5)	45.8	do not reject
Erlang(0., 1., 28.2)	14.6	do not reject	Pearson 6(0., 5.66e+004, 0.757, 1.48e+003)	36.6	do not reject
Pearson 6(0., 1.3e+003, 0.691, 32.7)	13.2	reject	Weibull(0., 0.834, 27.3)	36.5	do not reject
Gamma(0., 0.72, 39.2)	12.4	reject	Exponential(0., 29.9)	2.88	reject
Weibull(0., 0.83, 25.8)	7.25	reject	Erlang(0., 1., 29.9)	2.87	reject
Lognormal(0., 2.5, 1.72)	0.	reject	LogLogistic(0., 1.15, 16.)	2.71	reject
Uniform(0., 136)	0.	reject	Lognormal(0., 2.59, 1.64)	1.09e-002	reject
Inverse Gaussian(0., 2., 28.2)	0.	reject	Uniform(0., 147)	0.	reject
LogLogistic(0., 1.09, 15.9)	0.	reject	Inverse Gaussian(0., 1.27, 29.9)	0.	reject
Triangular(0., 140, 0.)	0.	reject	Triangular(0., 149, 0.)	0.	reject
Inverse Weibull(0., 0.5, 0.21)	0.	reject	Inverse Weibull(0., 0.475, 0.186)	0.	reject
Pearson 5(0., 0.357, 0.667)	0.	reject	Pearson 5(0., 0.291, 0.355)	0.	reject
Power Function(0., 137, 0.414)	0.	reject	Power Function(0., 166, 0.396)	0.	reject
Rayleigh(0., 29.)	0.	reject	Rayleigh(0., 30.8)	0.	reject
Chi Squared(0., 13.2)	0.	reject	Chi Squared(0., 14.3)	0.	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
Johnson SB	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
TG2			TG4		

AMOSTRAGEM MENSAL

distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Gamma[0., 0.765, 66.2]	96.5	do not reject	Exponential[0., 35.9]	22.8	do not reject
Weibull[0., 0.842, 46.3]	93.8	do not reject	Erlang[0., 1., 35.9]	22.7	do not reject
Pearson 6[0., 744, 0.821, 13.7]	72.5	do not reject	LogLogistic[0., 1.47, 22.6]	14.9	do not reject
LogLogistic[0., 1.21, 26.5]	48.7	do not reject	Gamma[0., 0.93, 38.6]	10.	reject
Beta[0., 279, 0.624, 2.66]	39.8	do not reject	Pearson 6[0., 283, 1.02, 9.1]	8.96	reject
Johnson SB[0., 267, 1.18, 0.55]	17.7	do not reject	Beta[0., 520, 0.857, 11.3]	8.5	reject
Exponential[0., 50.6]	3.55	do not reject	Weibull[0., 0.948, 35.]	8.08	reject
Erlang[0., 1., 50.6]	3.55	do not reject	Lognormal[0., 2.95, 1.4]	0.	reject
Lognormal[0., 3.14, 1.53]	1.87	reject	Uniform[0., 260]	0.	reject
Power Function[0., 266, 0.41]	7.93e-003	reject	Inverse Gaussian[0., 3.92, 35.9]	0.	reject
Uniform[0., 253]	0.	reject	Triangular[0., 264, 0.]	0.	reject
Inverse Gaussian[0., 4.9, 50.6]	0.	reject	Inverse Weibull[0., 0.545, 0.115]	0.	reject
Triangular[0., 258, 0.]	0.	reject	Pearson 5[0., 0.391, 1.38]	0.	reject
Inverse Weibull[0., 0.549, 9.88e-002]	0.	reject	Power Function[0., 483, 0.31]	0.	reject
Pearson 5[0., 0.4, 1.78]	0.	reject	Rayleigh[0., 38.9]	0.	reject
Rayleigh[0., 53.4]	0.	reject	Chi Squared[0., 20.2]	0.	reject
Chi Squared[0., 24.2]	0.	reject	Pareto	no fit	reject
Pareto	no fit	reject	Johnson SB	no fit	reject
TG1			TG3		
distribution	rank	acceptance	distribution	rank	acceptance
Beta[0., 174, 0.691, 2.46]	62.1	do not reject	Beta[0., 219, 0.701, 3.13]	100	do not reject
Exponential[0., 38.1]	53.8	do not reject	Weibull[0., 0.905, 38.1]	81.6	do not reject
Erlang[0., 1., 38.1]	53.8	do not reject	Gamma[0., 0.823, 48.3]	67.6	do not reject
Weibull[0., 0.927, 37.]	38.7	do not reject	Pearson 6[0., 2.46e+003, 0.789, 48.]	57.7	do not reject
Gamma[0., 0.834, 45.7]	27.5	do not reject	Exponential[0., 39.7]	52.7	do not reject
Pearson 6[0., 1.41e+004, 0.83, 307]	25.4	do not reject	Erlang[0., 1., 39.8]	52.7	do not reject
LogLogistic[0., 1.22, 23.7]	7.47	do not reject	LogLogistic[0., 1.23, 23.6]	21.1	do not reject
Power Function[0., 152, 0.479]	0.457	do not reject	Power Function[0., 173, 0.456]	0.208	reject
Lognormal[0., 2.93, 1.6]	3.3e-002	reject	Lognormal[0., 2.96, 1.59]	0.14	reject
Johnson SB[0., 139, 0.84, 0.513]	4.14e-015	reject	Uniform[0., 173]	0.	reject
Uniform[0., 149]	0.	reject	Inverse Gaussian[0., 1.23, 39.7]	0.	reject
Inverse Gaussian[0., 2.9, 38.1]	0.	reject	Triangular[0., 178, 0.]	0.	reject
Triangular[0., 153, 0.]	0.	reject	Inverse Weibull[0., 0.451, 0.127]	0.	reject
Inverse Weibull[0., 0.501, 0.13]	0.	reject	Pearson 5[0., 0.254, 0.302]	0.	reject
Pearson 5[0., 0.347, 0.936]	0.	reject	Rayleigh[0., 39.4]	0.	reject
Rayleigh[0., 36.7]	0.	reject	Chi Squared[0., 20.4]	0.	reject
Chi Squared[0., 19.8]	0.	reject	Johnson SB[0., 151, 0.961, 0.54]	-2.07e-014	reject
Pareto	no fit	reject	Pareto	no fit	reject
TG2			TG4		