

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA**  
**ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**RUBENS DANIEL SILVA DO PRADO**

**QUANTIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UMA PLANTA DE  
ESTOCAGEM DE GÁS LIQUEFEITO DO PETRÓLEO (GLP)**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2016**

**RUBENS DANIEL SILVA DO PRADO**

**QUANTIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UMA PLANTA DE  
ESTOCAGEM DE GÁS LIQUEFEITO DO PETRÓLEO (GLP)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

**CURITIBA**

**2016**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CÂMPUS CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA**  
**ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**QUANTIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UMA PLANTA DE ESTOCAGEM DE  
GÁS LIQUEFEITO DO PETRÓLEO (GLP)**

por

RUBENS DANIEL SILVA DO PRADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 15 de dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano  
Prof. Orientador

---

Prof. Dr. Emerson Rigoni

---

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

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

## RESUMO

PRADO, R. D. S. **QUANTIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UMA PLANTA DE ESTOCAGEM DE GÁS LIQUEFEITO DO PETRÓLEO (GLP)**. 2016. 54 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade - Departamento de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Baseado nos princípios da gestão de ativos, a confiabilidade se mostra como uma importante ferramenta para a definição de estratégias voltadas para os setores operacionais e de manutenção em grandes organizações. Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo quantificar a confiabilidade de uma planta de estocagem de gás liquefeito do petróleo (GLP) em suas principais configurações operacionais. Através da utilização das informações de intervenções de manutenção obtidas do *software* de gestão, foi possível criar modelos de confiabilidade para os equipamentos dos processos e validá-los junto aos consultores da companhia. Assim, com base nos resultados, buscou-se definir tecnicamente os pontos fortes e de maior vulnerabilidade da planta como um todo e propor ações para minimizar os pontos críticos encontrados. O resultado final identificou a etapa com menor confiabilidade dentro do processo e os equipamentos mais suscetíveis a falhas. Foi recomendado um maior acompanhamento destes elementos através de técnicas preditivas, políticas de sobressalentes mais adequadas e priorização das frentes de trabalho.

**Palavras-chave:** Configurações operacionais; Gás Liquefeito do Petróleo (GLP); Gestão de Ativos; Manutenção; Modelos de confiabilidade.

## ABSTRACT

PRADO, R. D. S. **Reliability Quantification of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Storage Plant.** 2016. 54 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade - Departamento de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This study demonstrate the use of Reliability Engineering tools, principally the life data analysis, in the definition of locomotive turbocharger maintenance strategies, in order to optimize the total cost of maintenance and increase the system reliability, reducing the risk of catastrophic failures that can produce large impacts on trains operations. This is an applied research and can be defined as bibliographic and documentary, using maintenance records and procedures about the component (turbocharger). On the results, the study identified opportunities to review the maintenance intervals based on component failure behavior, aligned to the company's strategic planning. Through this work were defined strategies that reduce the incidence of each failure mode, as well the preventive replacement interval that minimizes the maintenance cost of the component, reducing the maintenance cost of the company. The final result identified the stage with less reliability within the process and the equipment more susceptible to failure. It was recommended a greater monitoring of these elements through predictive techniques, more suitable spare policies and prioritization of the work fronts.

**Keywords:** Asset management; Liquefied Petroleum Gas (LPG); Maintenance; Operational settings; Reliability models.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dados completos .....	17
Figura 2 – Dados censurados à direita (Suspensões) .....	18
Figura 3 – Dados censurados no intervalo .....	18
Figura 4 – Dados censurados à esquerda.....	19
Figura 5 – Curvas f.d.p. para diferentes valores de $\beta$ .....	21
Figura 6 – Curvas de confiabilidade para diferentes valores de $\beta$ .....	21
Figura 7 – Curvas de taxa de falhas para diferentes valores de $\beta$ .....	22
Figura 8 – Curvas f.d.p. para diferentes valores de $\eta$ .....	23
Figura 9 – Curvas f.d.p. para diferentes valores de $\gamma$ .....	23
Figura 10 – Diagrama de blocos: Configuração série.....	24
Figura 11 – Diagrama de blocos: Configuração paralelo.....	25
Figura 12 – Esferas pressurizadas de GLP.....	27
Figura 13 – Esferas pressurizadas (Esq.) e tanques refrigerados (Dir.) .....	28
Figura 14 – Esquemático representativo do recebimento de GLP.....	29
Figura 15 – Trocador de calor do tipo Casco e Tubo .....	30
Figura 16 – Esquemático representativo da retirada de GLP .....	31
Figura 17 – Esquemático representativo da estocagem de GLP .....	32
Figura 18 – Unidade de condensação.....	35
Figura 19 – Unidade de refrigeração.....	37
Figura 20 – Unidade soprador.....	39
Figura 21 – Bombas de GLP refrigerado.....	40
Figura 22 – Bombas de GLP pressurizado.....	42
Figura 23 – Permutadores.....	43
Figura 24 – Recebimento – Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	46
Figura 25 – Expedição – Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	47
Figura 26 – Estocagem – Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Unidade de condensação – Dados obtidos do SAP .....	35
Tabela 2 – Unidade de condensação – Parâmetros de confiabilidade .....	36
Tabela 3 – Unidade de refrigeração – Dados obtidos do SAP.....	37
Tabela 4 – Unidade de refrigeração – Parâmetros de confiabilidade .....	38
Tabela 5 – Unidade soprador – Dados obtidos do SAP .....	39
Tabela 6 – Unidade soprador – Parâmetros de confiabilidade .....	39
Tabela 7 – Bombas de GLP refrigerado – Dados obtidos do SAP .....	40
Tabela 8 – Bombas de GLP refrigerado – Parâmetros de confiabilidade .....	41
Tabela 9 – Bombas de GLP pressurizado – Dados obtidos do SAP .....	42
Tabela 10 – Bombas de GLP pressurizado – Parâmetros de confiabilidade .....	43
Tabela 11 – Permutadores – Dados obtidos do SAP .....	44
Tabela 12 – Permutadores – Parâmetros de confiabilidade .....	44
Tabela 13 – Recebimento – Resultados da simulação.....	49
Tabela 14 – Expedição – Resultados da simulação .....	50
Tabela 15 – Estocagem – Resultados da simulação .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS

GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LDA	<i>Life Data Analysis</i>
RBC	Rede Brasileira de Calibração
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i>
SAP	<i>Systems, Applications, Products in Data Processing</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1. TEMA .....	11
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.3. JUSTIFICATIVA.....	12
1.4. OBJETIVOS .....	13
1.4.1. OBJETIVO GERAL.....	13
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.5. METODOLOGIA.....	13
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS .....	16
2.2. DISTRIBUIÇÃO DE DADOS DE VIDA.....	19
2.3. DIAGRAMA DE BLOCOS.....	24
<b>3. ANÁLISE DO SISTEMA OPERACIONAL .....</b>	<b>27</b>
3.1. RECEBIMENTO DO GLP .....	27
3.2. EXPEDIÇÃO DO GLP .....	29
3.3. ESTOCAGEM DO GLP .....	31
3.4. CONFIGURAÇÕES DE ESTUDO.....	33
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
4.1. MODELOS DE CONFIABILIDADE .....	34
4.1.1. UNIDADES DE CONDENSAÇÃO .....	34
4.1.2. UNIDADES DE REFRIGERAÇÃO .....	36
4.1.3. UNIDADES SOPRADORES .....	38
4.1.4. BOMBAS DE GLP REFRIGERADO .....	40
4.1.5. BOMBAS DE GLP PRESSURIZADO .....	41
4.1.6. PERMUTADORES .....	43
4.2. CONFIGURAÇÕES OPERACIONAIS .....	45
4.2.1. RECEBIMENTO DE GLP .....	45
4.2.2. EXPEDIÇÃO DE GLP .....	46
4.2.3. ESTOCAGEM DE GLP .....	47
4.3. SIMULAÇÕES .....	48
4.3.1. RECEBIMENTO DE GLP .....	48
4.3.2. EXPEDIÇÃO DE GLP.....	49
4.3.3. ESTOCAGEM DE GLP.....	50
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
5.1. TRABALHOS FUTUROS.....	53
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios do desenvolvimento da sociedade, o homem busca maneiras de utilizar o meio em que ele vive para obter uma melhor qualidade de vida. A utilização das energias naturais, como o fogo, a água e o vento para auxiliar em suas atividades de agricultura, caça e alimentação, o ajudou a iniciar a fixação de pequenas populações em determinados lugares. Com o passar dos séculos, novas formas de utilizar os recursos naturais foram descobertos, como o início de uma metalurgia artesanal, o desenvolvimento da construção civil e o aperfeiçoamento dos processos de irrigação na agricultura. Assim, a sociedade dava os primeiros passos em direção aos tempos de hoje (HOBBSAWN, 2007).

No final do século XVIII, iniciou-se na Inglaterra a 1ª Revolução Industrial, a qual foi marcada pelo início da utilização em grande escala dos motores a combustão, o desenvolvimento dos teares mecanizados e a utilização da mão de obra assalariada. Todo este desenvolvimento foi sustentado tendo o carvão mineral como principal matriz energética. A indústria passou a ser o grande destaque econômico dos ingleses, transformando-os na maior potência da época e no exemplo a ser seguido pelos demais países (IGLÉSIAS, 1981).

Na segunda metade do século XIX, o mundo viu nascer a 2ª Revolução Industrial, a qual, de forma mais democrática, atingiu não só a Inglaterra, como também os Estados Unidos (EUA) e os demais países da Europa Ocidental. Esta etapa foi marcada pelo grande desenvolvimento industrial do setor químico e siderúrgico; e em substituição ao carvão mineral, os pilares da nova matriz energética passaram a ser a eletricidade, o petróleo e seus derivados, os quais, atualmente, formam as principais formas de energia utilizadas no mundo (HENDERSON, 1979).

Por fim, desde o final do século XX até os dias de hoje, vivencia-se a 3ª revolução industrial, cujo cerne se baseia na internet e no grande desenvolvimento computacional. Nesta etapa, devido ao desenvolvimento de microprocessadores, da alta capacidade da implementação de simuladores e da alta competitividade econômica, a importância da produção em larga escala passou a ser acompanhada da necessidade da alta eficiência. Assim, a produção “a qualquer custo” dá lugar para a produção com baixo custo e alto rendimento, o qual é sustentado com novos conceitos voltados tanto para os recursos humanos, como a melhoria na capacitação

dos colaboradores e o oferecimento de melhores condições de trabalho, quanto para os aspectos técnicos e de engenharia, como a evolução das ideias relativas à manutenção e o progresso da teoria da confiabilidade.

Com relação ao primeiro aspecto técnico citado, a manutenção tem passado por diversas gerações de ideias desde o início do século XX, começando com o pensamento precipitado e errôneo de que somente se deve efetuar a manutenção de um equipamento após a sua quebra para evitar paradas no sistema de produção. Em seguida, surge a segunda geração baseada na ideia de que as falhas em equipamentos ocorrem devido ao tempo de operação dos mesmos e que, com base nesta informação, é necessária a sua parada preventiva para a realização da manutenção (RECUERO, 2000).

Com a necessidade de se ter um rendimento melhor do progresso e evitar paradas preventivas que não são necessárias, nasce a terceira geração da manutenção, a qual é baseada no monitoramento da condição dos equipamentos, conhecida como técnica preditiva, e assim se determinar a necessidade de sua parada. Hoje em dia, vive-se a quarta geração da manutenção, tendo como seu principal pilar a abrangência dos conceitos da confiabilidade.

### 1.1. Tema

A cadeia de gestão da manutenção, a qual envolve desde a política de sobressalentes e elaboração de planos de manutenção até a alocação das frentes de trabalho durante o dia a dia, deve ser cada vez mais otimizada para que as companhias apresentem resultados melhores em um mundo altamente competitivo. Dentro deste contexto, a aplicação dos conceitos de confiabilidade se apresenta como uma importante ferramenta para auxiliar na tomada de decisão com relação à gestão de manutenção.

Este trabalho apresenta o tema de quantificação da confiabilidade para que o grupo de lideranças da empresa possa focar e priorizar os ativos mais sensíveis do processo, de forma a minimizar os problemas de confiabilidade através de uma manutenção mais eficientes, com recursos críticos sempre disponíveis e planos de manutenção com base na condição.

## 1.2. Formulação do Problema

Dentro do atual contexto econômico do país, os recursos disponibilizados para a realização de manutenção têm sido reduzidos, tanto em termos humanos quanto em materiais. Desta forma, é de fundamental importância se ter conhecimento completo da planta industrial de modo que seja priorizado o atendimento de planos e solicitações de manutenção dos equipamentos mais sensíveis do processo.

Assim, através da análise do histórico de falhas dos equipamentos contidos no software de gestão da manutenção e com o conhecimento técnico dos principais manutentores e operadores do sistema operacional, deverá ser desenvolvido um modelo de confiabilidade para os sistemas com o objetivo de fornecer subsídios para a tomada de decisão gerencial.

## 1.3. Justificativa

Todo o processo de uma determinada empresa, idealmente, deve ter como base o ciclo do custo de vida otimizado de cada equipamento, considerando as etapas de aquisição, operação, manutenção e a etapa final de descontinuação do mesmo. Assim, durante a operação de uma planta complexa, é muito importante utilizar a teoria de confiabilidade para se determinar planos de manutenção adequados, política de sobressalentes que atendam as demandas e a quantificação da confiabilidade para se tomar decisões com base em informações de modelos matemáticos validados e não mais somente em experiência ou palpites (BILLINTON et al, 1983).

Com base no contexto apresentado, a utilização dos conceitos da confiabilidade abrangidos na quarta geração da manutenção aplicados às bases modernas da terceira revolução industrial pode ser de grande valia para atingir a máxima eficiência dos processos de uma companhia e, conseqüentemente, promover o desenvolvimento financeiro, estrutural e das pessoas envolvidas com a mesma.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo Geral

Por meio da análise de dados de vida e simulação baseada em diagramas de blocos de confiabilidade, o objetivo geral da pesquisa é quantificar a confiabilidade dos processos de recebimento, expedição e estocagem de GLP de uma planta industrial e, com os resultados, aprimorar a gestão da manutenção como um todo.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto para chegar aos resultados são:

- Descrever e detalhar os processos de recebimento, expedição e estocagem de GLP;
- Introduzir os conceitos de confiabilidade na cultura de manutenção da empresa;
- Obter os dados de vida dos equipamentos dos processos e apresentar os modelos de confiabilidade dos mesmos;
- Identificar o processo e os equipamentos mais sujeitos às falhas;
- Avaliar o processo atual de planos de manutenção e políticas de sobressalentes e sugerir uma abordagem a respeito da gestão da manutenção mais eficiente nos processos mais críticos.

## 1.5. Metodologia

A metodologia de pesquisa aplicada neste trabalho se baseou nas ordens de manutenção contidas no *S.A.P.* Todas as ordens de manutenção apresentam diversos campos que devem ser preenchidos para realizar a confirmação dos serviços realizados durante a intervenção.

Desta forma, inicialmente foram tabeladas todas as ordens que causaram a parada do equipamento e/ou sistema desde 2008, considerando a data de início e

de fim do serviço, atividade relacionada e o modo de falha apontado. Uma vez que nunca foi realizada análise de confiabilidade quantitativa no sistema a ser estudado, foram consideradas que as manutenções realizadas nos equipamentos resultam em um retorno do ativo “*as good as new*”. A partir desta análise, foi possível obter os modelos de confiabilidade dos ativos.

Com estas informações reunidas, foi marcada reunião com os manutentores e operadores mais experientes do processo e foram validados os modelos probabilísticos encontrados.

Por fim, a partir dos modelos validados, utilizou-se o software BlockSim para realizar a simulação dos modelos de confiabilidade dos equipamentos por meio dos Diagramas de Blocos de Confiabilidade e os resultados são apresentados ao final deste trabalho.

## 1.6. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 2: expõe o referencial teórico relativo à análise de dados de vida e aos diagramas de blocos de confiabilidade (RBD) aplicados a este trabalho. Toda a base teórica desenvolvida será utilizada para o exemplo prático abordado no estudo;
- Capítulo 3: apresenta detalhadamente o processo da planta de armazenamento de GLP na qual será realizada a quantificação da confiabilidade, começando desde a configuração do sistema até as premissas operacionais consideradas para análise deste trabalho;
- Capítulo 4: mostra, em detalhes, a aplicação da teoria apresentada no capítulo 3 ao objeto de estudo descrito no capítulo 2. Assim, a teoria referente à análise de dados de vida e RBD será aplicada com o objetivo de se obter a resposta de confiabilidade da parte do sistema estudado do parque de armazenamento do GLP.

- Capítulo 5: neste capítulo são apresentadas as discussões sobre os resultados obtidos neste trabalho, considerando os pontos positivos, os pontos negativos, as dificuldades encontradas e as soluções para as mesmas. Por fim, são realizadas proposições de trabalhos futuros para a continuação e desenvolvimento da linha de pesquisa discutida neste trabalho.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, será apresentada a teoria envolvida para o tratamento dos dados obtidos no software de gestão da manutenção e de que modo foram implementados os modelos de confiabilidade dos equipamentos objeto do estudo e da inter-relação entre os mesmos. Através deste desenvolvimento foi possível quantificar a confiabilidade associada ao sistema analisado.

Basicamente, a teoria envolvida no desenvolvimento deste trabalho se fundamenta nos princípios da análise de dados de vida (LDA), a qual se baseia no estudo e modelagem do comportamento de vida de equipamentos, produtos ou outros objetos de análise. Para se modelar o comportamento de vida de equipamentos, é necessário possuir informações operacionais gerais destes ativos, como o tempo e o modo de operação, o histórico de falhas e o tempo em que ele ficou em manutenção (BILLINTON et al, 1983).

Uma empresa que ainda não possui um sistema de gestão da manutenção adequado dificilmente terá em mãos estas informações e, para iniciar as análises de confiabilidade e a modelagem do comportamento de vida dos equipamentos, necessitará da experiência dos colaboradores que mais conhecem a planta industrial. Já para empresas com um sistema de gestão amadurecido, todas estas informações podem ser consultadas em seu banco de dados, seja ele através de um software de gestão, como o SAP, ou de outra forma.

### 2.1. Classificação dos Dados

Em termos de análise de dados de vida, estes dados podem ser classificados em completos ou censurados. Os dados completos são aqueles em que o valor de cada amostra é observado e conhecido, conforme ilustrado na Figura 1. Como exemplo deste caso, pode-se citar o exato momento de parada de um compressor através do sistema supervisório da planta industrial. É importante observar que a grande maioria dos dados de vida obtidos não é completa (O'CONNOR, 2002).

Com relação aos dados censurados, estes não apresentam as informações completas das amostras que estão em análise, seja por diminuição de custos, pelo baixo impacto na operação da planta causado pela falha do componente, impossibilidade física, tecnológica ou ainda por outra estratégia definida (RELIASOFT, 2001).

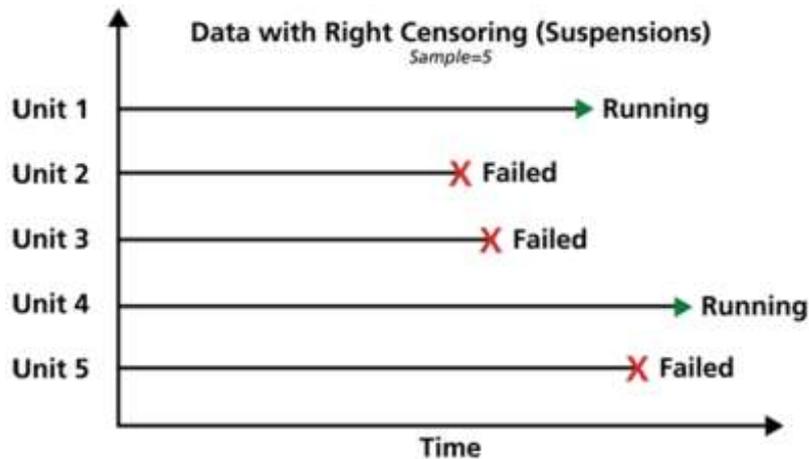
Estes dados censurados podem ser classificados da seguinte forma:



**Figura 1** – Dados completos

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 5: Life Data Classification*

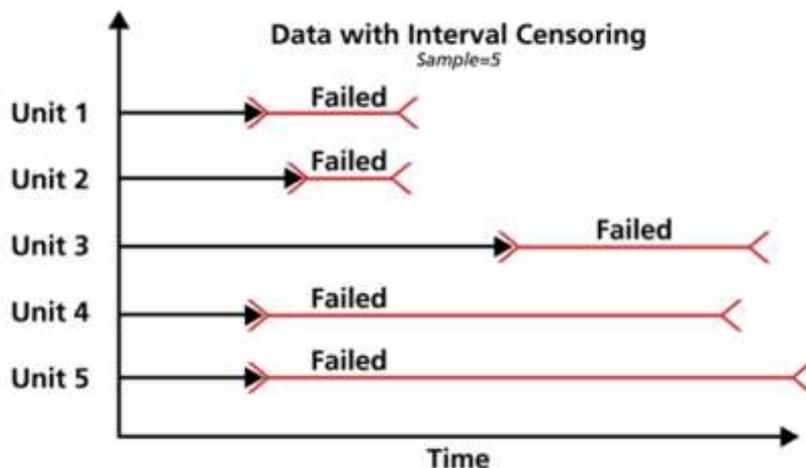
- Dados censurados à direita (Suspensões): Os dados se referem aos equipamentos que não apresentaram falhas no período de observação analisado, conforme mostrado na Figura 2. Por exemplo, de 5 motores observados em um período de 8760 horas, 3 apresentaram problemas de isolação enquanto que os outros 2 continuaram a operar sem nenhum problema. Assim, os motores que não apresentaram problemas devem ser considerados suspensões para a análise. É importante ressaltar que todos os dados de falhas, inclusive as suspensões, são fundamentais para se realizar uma correta modelagem da curva de confiabilidade do componente.



**Figura 2** – Dados censurados à direita (Suspensões)

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 5: Life Data Classification*

- Dados censurados no intervalo: Estes dados têm a característica de apresentar incertezas quanto ao exato tempo da falha, pois as amostras são observadas em intervalos de tempo definidos e não constantemente, conforme mostrado na Figura 3. Um exemplo para esta situação são os indicadores locais de pressão e temperatura. Estes instrumentos são observados durante a ronda na área pela equipe operacional, que ocorre a cada 4 horas. Assim, somente será observado que o instrumento apresentou o problema durante a vistoria.

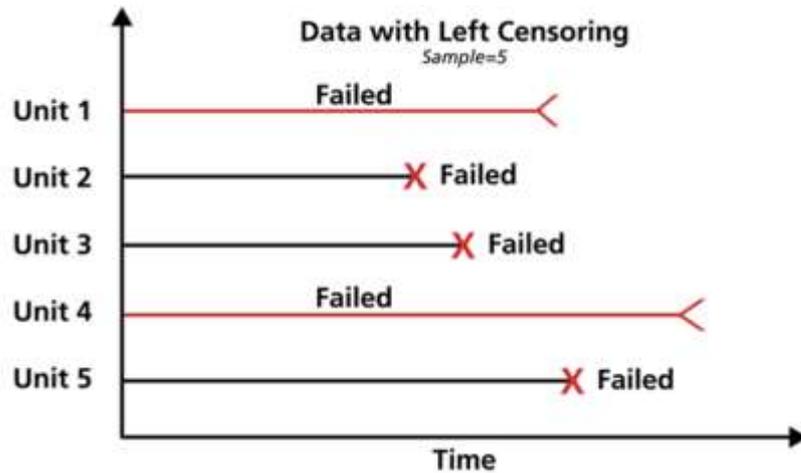


**Figura 3** – Dados censurados no intervalo

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 5: Life Data Classification*

- Dados censurados à esquerda: Este tipo de censura é similar à censura no intervalo, pois, da mesma maneira, apresenta incertezas quanto ao tempo da

falha, conforme mostrado na Figura 4. Neste caso, o tempo de falha somente é conhecido após certo tempo.



**Figura 4** – Dados censurados à esquerda

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 5: Life Data Classification*

## 2.2. Distribuição de Dados de Vida

Após a obtenção e classificação dos dados de vida do equipamento a ter seu grau de confiabilidade estudado, é importante analisar estas informações e verificar quais dos modelos matemáticos existentes representam de maneira adequada o ciclo de vida do item. Atualmente, há muitas distribuições de confiabilidade já implementadas, sendo as principais as seguintes e suas variações:

1. Distribuição Exponencial;
2. Distribuição Normal;
3. Distribuição Lognormal;
4. Distribuição Weibull;
5. Distribuição Gamma;
6. Distribuição Logística;
7. Distribuição Loglogística;
8. Distribuição Gumbel.

Todas as distribuições de confiabilidade apresentam características próprias que permitem associá-las a determinados comportamentos tradicionais de dispositivos e equipamentos utilizados nas mais diversas aplicações.

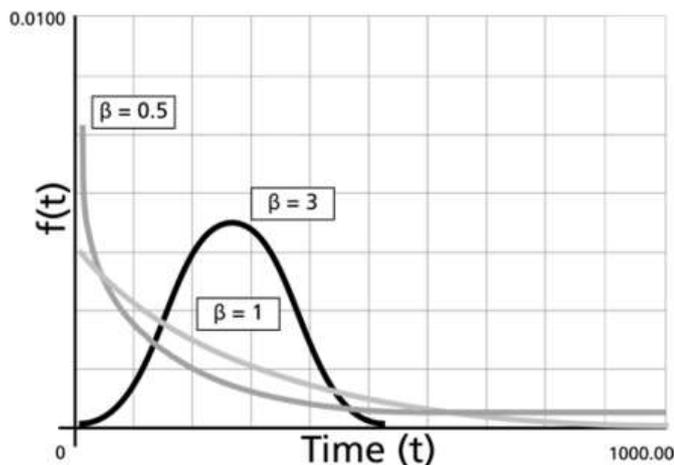
A distribuição exponencial, por exemplo, tem a características de apresentar o parâmetro taxa de falha constante, independente do tempo de vida do elemento. Este tipo de comportamento pode estar associado a dispositivos eletrônicos ou demais equipamentos que não sofrem com o processo de desgaste mecânico (atrito) ou físico (umidade, temperatura e entre outros) (RELIASOFT, 2001).

Já a distribuição Weibull, que mais será utilizada neste trabalho, tem a propriedade de ser versátil pelo fato de seu parâmetro  $\beta$ , conhecido como fator de forma, poder assumir as características de outras distribuições de confiabilidade. Um exemplo desta versatilidade é que quando o parâmetro  $\beta$  assume o valor unitário, a distribuição Weibull passa a se comportar com uma distribuição exponencial. Para assumir o comportamento próximo ao da distribuição normal, o fator de forma deverá assumir o valor de 3,5. A função densidade de probabilidade da distribuição Weibull é dada por:

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

Os demais parâmetros desta distribuição são o de vida característica, dado por  $\eta$ , e o de posição ou deslocamento, dado por  $\gamma$ .

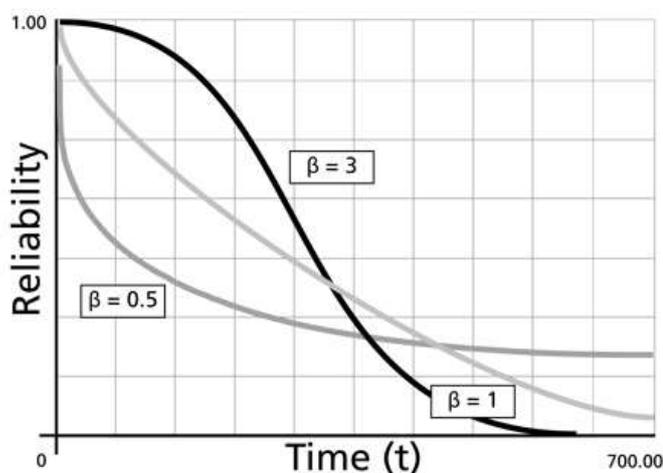
Para demonstrar como o parâmetro de forma  $\beta$  influencia as curvas de função densidade de probabilidade, confiabilidade (*reliability*) e taxa de falha (*failure rate*), as Figuras 5, 6 e 7, respectivamente, contém os gráficos para valores de  $\beta$  menor que 1, igual a 1 e maior que 1.



**Figura 5** – Curvas f.d.p. para diferentes valores de  $\beta$

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 8: The Weibull Distribution*

A análise do gráfico da curva f.d.p. mostra a grande influência que o este fator exerce sobre o comportamento de confiabilidade do elemento. A semelhança que já era esperada entre as curvas é o comportamento assintótico a zero das mesmas para o tempo tendendo ao infinito. Por outro lado, ao observar a função em valores de tempo próximos a zero, têm-se que as curvas de  $\beta \leq 1$  são estritamente decrescentes no tempo, enquanto que a curva para  $\beta = 3$  aumenta seu valor durante um certo intervalo de tempo, permanecendo próximo a zero durante os outros intervalos, o que indica uma maior previsibilidade de falha do componente.

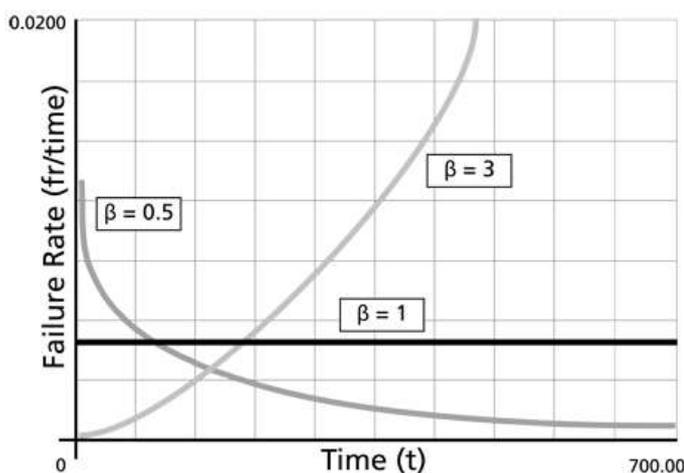


**Figura 6** – Curvas de confiabilidade para diferentes valores de  $\beta$

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 8: The Weibull Distribution*

Com relação às curvas de confiabilidade, todas elas apresentam a característica estritamente decrescente, uma vez que a confiabilidade de um

elemento cai com o passar do tempo. No entanto, algumas características particulares podem ser observadas em cada curva, como a grande queda da confiabilidade logo após o início da operação do elemento e a tendência de estabilização para a curva  $\beta = 0,5$ ; a queda constante da confiabilidade ao longo do tempo para  $\beta = 1$ ; e a queda abrupta da confiabilidade durante um intervalo de tempo para  $\beta = 3$ , indicando novamente uma maior previsibilidade de falha do elemento.



**Figura 7** – Curvas de taxa de falhas para diferentes valores de  $\beta$

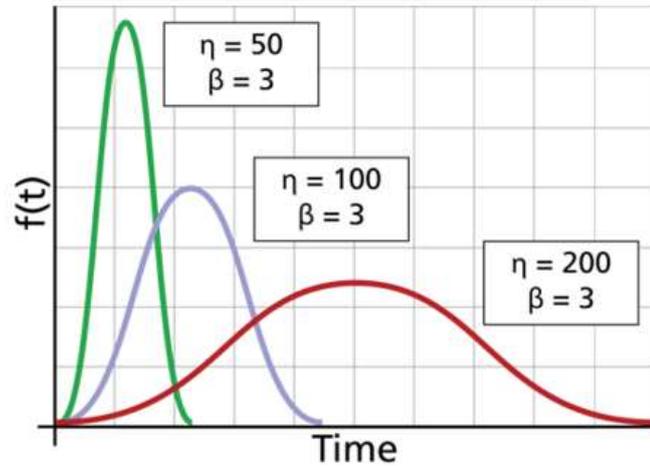
Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 8: The Weibull Distribution*

Por fim, as curvas de taxa de falha mostram um comportamento ao longo do tempo completamente diferente das mesmas dependendo do parâmetro  $\beta$ , sendo que para  $\beta = 0,5$  tem característica decrescente, para  $\beta = 1$  tem comportamento constante e para  $\beta = 3$  apresenta característica crescente.

O parâmetro de vida característica ( $\eta$ ), ou de escala, tem como propriedade alongar a curva da f.d.p. ao longo do eixo das abscissas. Desta forma, quanto maior o valor de  $\eta$ , mais longa a curva no eixo x e menor a sua amplitude no eixo das ordenadas e, quanto menor o valor de  $\eta$ , mais curta a curva no eixo das abscissas e maior a sua amplitude no eixo y. A Figura 8 ilustra o comportamento da curva para diferentes valores de  $\eta$ .

Do ponto de vista das análises de confiabilidade, quanto menor o valor do parâmetro de escala, mais previsível se tornam as amostras analisadas, uma vez que os dados obtidos em testes se concentram em um intervalo de tempo mais curto. Por outro lado, se o valor do parâmetro de vida característica é elevado, os

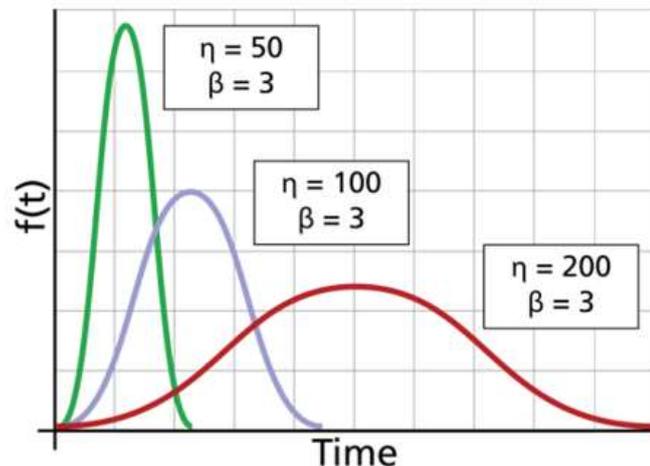
dados obtidos em testes para caracterizar as amostras se espalham por um intervalo de tempo maior e, por consequência, de menor previsibilidade em termos de dados de falha.



**Figura 8** – Curvas f.d.p. para diferentes valores de  $\eta$

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 8: The Weibull Distribution*

O parâmetro de posição ( $\gamma$ ), ou de deslocamento, tem por característica deslocar a curva f.d.p. no eixo das abscissas. A Figura 9 mostra esta propriedade do parâmetro  $\gamma$ .



**Figura 9** – Curvas f.d.p. para diferentes valores de  $\gamma$

Fonte: Site reliawiki.org / *Life Data Analysis Book / Chapter 8: The Weibull Distribution*

O parâmetro de deslocamento nada mais representa que o início da possibilidade de um elemento falhar. Assim, quando  $\gamma$  apresenta valor positivo, somente a partir deste determinado valor o componente poderá falhar. Como exemplo destes casos, podem-se citar as pastilhas de freios na indústria

automobilística, as quais somente apresentam falhas após um determinado nível de desgaste do elemento.

Por outro lado, quando  $\gamma$  apresenta valor negativo, o elemento pode falhar antes mesmo de iniciar o seu ciclo operacional. Normalmente, este caso ocorre para componentes que apresentam um alto nível de sensibilidade em seu período de armazenagem.

### 2.3. Diagrama de Blocos

A representação de sistemas através de diagrama de blocos é utilizada com o objetivo de mostrar as relações de confiabilidade entre os seus diversos elementos. Apesar dos mais variados sistemas apresentarem configurações diferentes e complexas, é possível identificar algumas relações padrão entre os blocos, sendo as mais conhecidas as configurações série, paralelo e k-de-n (KUO et al, 2003).

A configuração série é a mais comum entre os componentes. Ela é caracterizada pelo fato de que todos os componentes devem funcionar para que o sistema funcione. Os exemplos desta configuração são o telefone sem fio e impressoras em geral. A Figura 10 representa esta configuração.

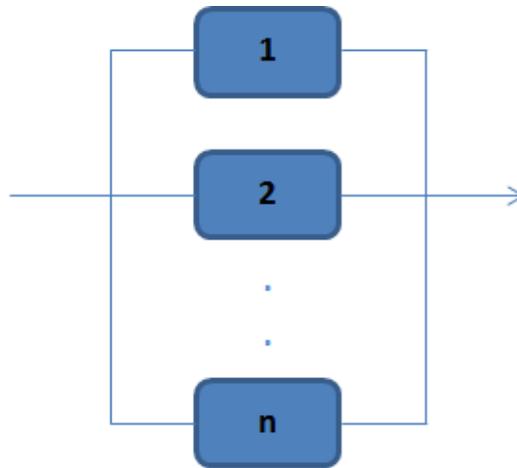


**Figura 10** – Diagrama de blocos: Configuração série  
Fonte: Autoria própria

Do ponto de vista matemático, considerando que “R” representa a confiabilidade e “E” o sucesso do elemento indicado pelo seu índice correspondente, a confiabilidade de um sistema em configuração série é dada por:

$$R_S = P[E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n] = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

Com relação à configuração paralelo, todos os elementos de um mesmo caminho devem falhar para que o sistema falhe. A Figura 11 representa esta configuração.



**Figura 11** – Diagrama de blocos: Configuração paralelo  
Fonte: Autoria própria

Os exemplos mais comuns da utilização deste arranjo são os backups gerados por empresas. Matematicamente, considerando que “Q” representa a não confiabilidade e  $\bar{E}$  o insucesso do elemento indicado pelo seu índice correspondente, a confiabilidade de um sistema em configuração paralelo é dada por:

$$Q_S = P[\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_n] \rightarrow R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (3)$$

Por fim, os sistemas no arranjo k-de-n são aqueles nos quais pelo menos “k” componentes devem estar operando, considerando um total de “n” elementos ( $n \geq k$ ), para que o sistema opere em conformidade. Os sistemas em configuração série pura são sistemas k-de-n no qual  $k = n$ , enquanto que os sistemas com arranjo paralelo são sistemas k-de-n no qual  $k = 1$ .

São exemplos deste arranjo as centrais de geração de energia que operam com três geradores, mas que necessitam de somente dois operantes para suprir a demanda ou os carros que possuem cinco pneus (considerando um step) e que precisam de quatro em conformidade para poder funcionar. A equação matemática que representa a confiabilidade de um sistema em configuração k-de-n é dada por:

$$R_S = \sum_{i=k}^n \left( \frac{n!}{(n-i)!i!} \right) R^i (1-R)^{n-i} \quad (4)$$

### 3. ANÁLISE DO SISTEMA OPERACIONAL

A seguir serão apresentados os principais processos envolvidos na planta de GLP, considerando os equipamentos fundamentais envolvidos nos mesmos e as suas inter-relações. Os conceitos mostrados no Capítulo 2 foram aplicados nos dados de vida obtidos dos processos a seguir a fim de quantificar a confiabilidade da planta de processo.

As plantas de processo relativas ao setor petrolífero normalmente são de uma elevada complexidade e muito abrangentes, sendo que há unidades diferentes para cada derivado a ser explorado. O foco deste trabalho é a unidade de GLP de uma planta de estocagem/recebimento/expedição e nos próximos parágrafos serão apresentadas as principais etapas envolvidas na unidade de GLP para que se possa criar um modelo matemático que represente fielmente este processo e, por conseguinte, obter os dados de confiabilidade do sistema. Para deixar claro, quando for citado GLP está se referindo aos hidrocarbonatos propano ( $C_3H_8$ ), butano ( $C_4H_{10}$ ) e seus compostos.

#### 3.1. Recebimento do GLP

A primeira etapa a ser apresentada é o recebimento do gás na planta industrial. Nesta etapa, um modal, normalmente dutoviário ou marítimo, carregado de GLP inicia a transferência de produto para um local de armazenagem.



**Figura 12** – Esferas pressurizadas de GLP

Fonte: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/teste-galeria/replan>

O local no qual o gás será armazenado depende de seu estado físico, sendo que serão utilizadas esferas quando o produto está no estado líquido e pressurizado, mostradas nas Figura 12 e Figura 13; e tanques quando o mesmo se encontra no estado líquido e refrigerado, com temperatura inferior a 0°C, mostrado na Figura 13.



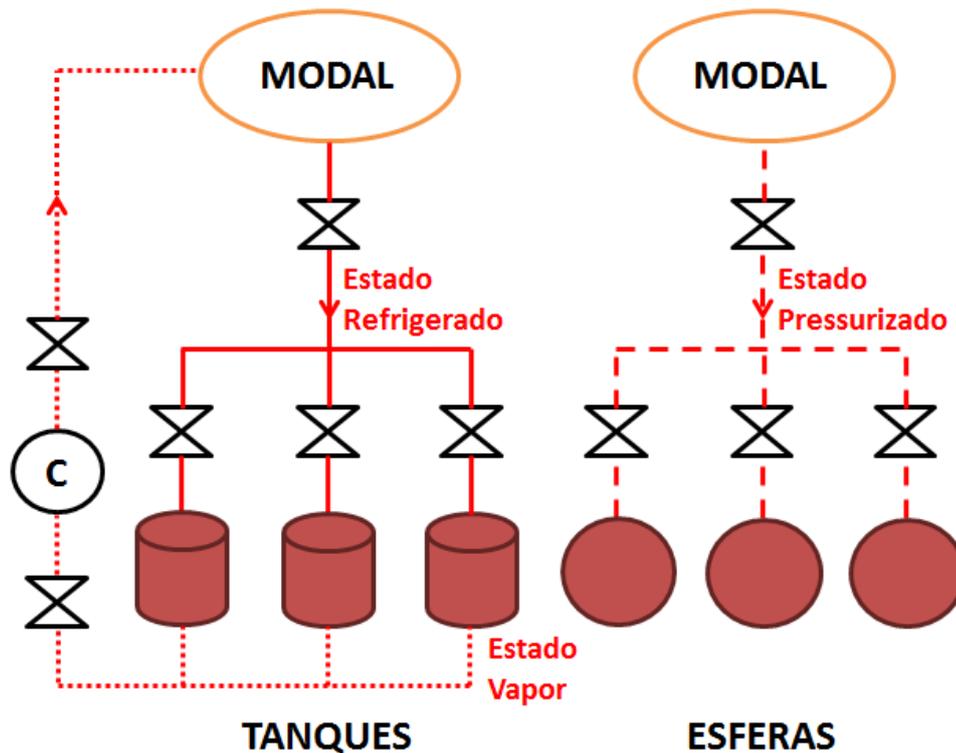
**Figura 13** – Esferas pressurizadas (Esq.) e tanques refrigerados (Dir.)

Fonte: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/transpetro-inicia-testes-de-operacao-com-glp-refrigerado-na-baia-de-guanabara.htm>

O recebimento em tanques e esferas é realizado através de um sistema de tubulações e alinhamento de válvulas, sendo todo o processo acompanhado em tempo real através da indicação e transmissão de grandezas como pressão, temperatura e vazão pelo sistema de instrumentação instalado ao longo das tubulações, o que permite o controle do sistema por parte do setor operacional.

Uma característica importante a se salientar é que quando o gás se encontra na fase líquida e refrigerada, o produto, mesmo sendo armazenado em um tanque que minimize ao máximo as trocas térmicas com o ambiente, acaba sofrendo um processo térmico e uma pequena parcela dele se transforma em vapor. Este processo não é desejável, pois acarreta em um aumento de pressão no interior do tanque e, quando não controlado, pode levar o processo a um estado de instabilidade.

Para minimizar este processo, há uma tubulação de saída deste vapor no tanque que o direciona para um compressor, cuja descarga é alinhada para o modal do recebimento, normalmente navios. Assim, além de controlar a pressão interna do tanque, este processo, conhecido como “retorno de vapor”, possibilita maximizar a vazão de descarga do modal, pois gera um aumento na diferença de pressão entre o ponto de saída do GLP e o ponto de entrada do mesmo. O desenho representativo do processo apresentado é mostrado na Figura 14. Este processo também ocorre quando o produto está no estado pressurizado, porém em uma menor intensidade e não há o risco de levar o processo a instabilidade, visto que já se encontra em uma instalação própria para as elevadas pressões.



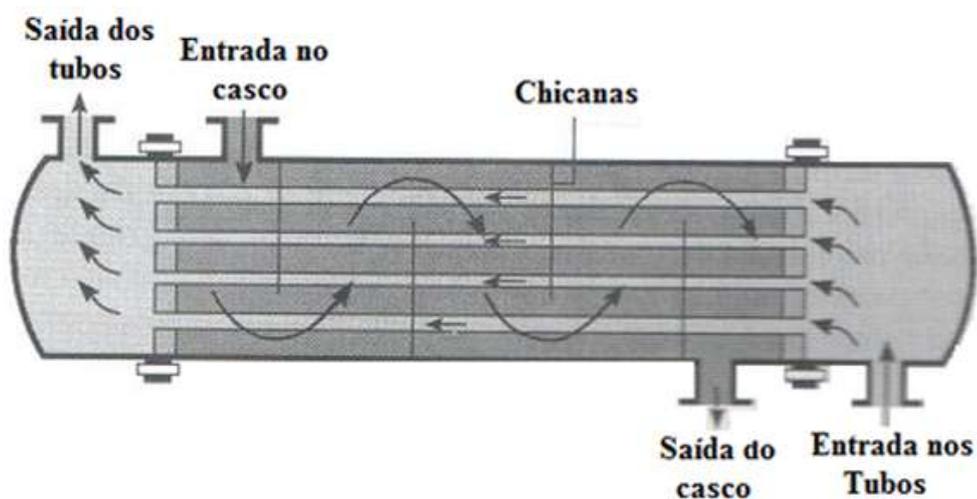
**Figura 14** – Esquema representativo do recebimento de GLP  
Fonte: Autoria própria

### 3.2. Expedição do GLP

Com relação à expedição de GLP, ou seja, a saída do gás do terminal de estocagem, na planta operacional analisada somente ocorre esta operação com o

produto no estado líquido e pressurizado. Desta forma, o GLP que está contido nas esferas é direcionado para um sistema de bombeio que garante a chegada deste produto para os clientes contratantes. Já o GLP que está contido nos tanques refrigerados sofre um processo de troca térmica com a água através de trocadores de calor do tipo casco e tubo, o qual é mostrado na Figura 15, atingindo as características físicas do gás pressurizado e possibilitando o seu armazenamento nas esferas.

Apesar do produto no estado líquido depender de um processo de troca térmica para possibilitar o seu escoamento, a estocagem do GLP neste estado físico é vantajosa pelo fato deste produto expandir cerca de 15% quando aquecido. Assim, o produto no estado líquido e refrigerado ocupa um espaço reduzido em relação ao estado pressurizado, ainda sem ter que atingir pressões elevadas.



**Figura 15** – Trocador de calor do tipo Casco e Tubo

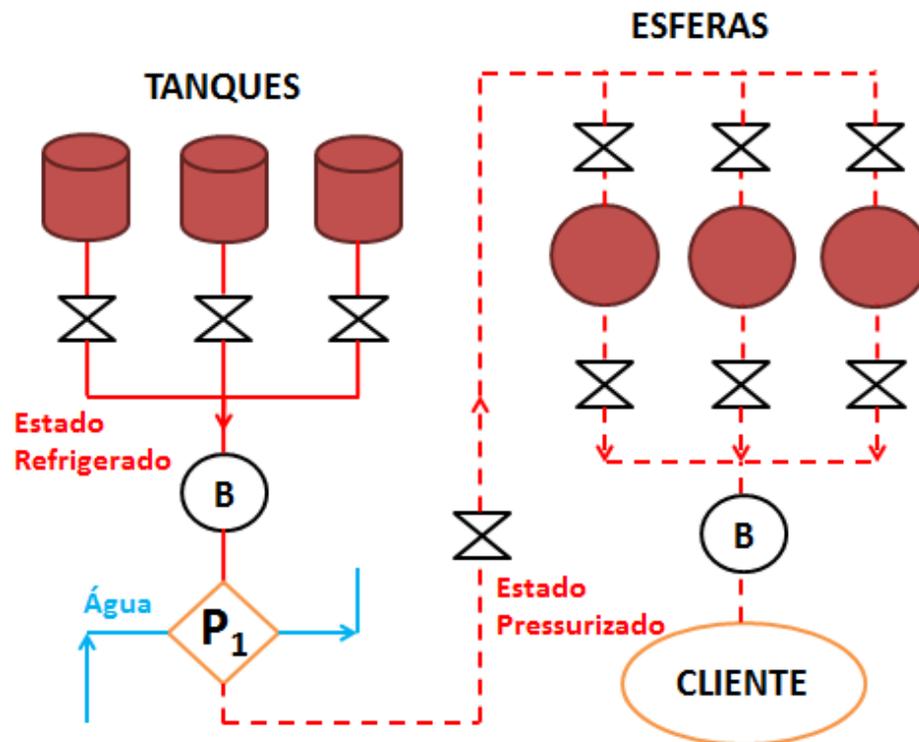
Fonte: <http://www.cdcequipamentos.com/tipos-de-trocadores-de-calor>

A representação completa da operação de expedição descrita anteriormente é mostrada na Figura 16.

Assim como acontece na etapa de recebimento, todo o processo de expedição também é realizado através de alinhamento de válvulas e é inteiramente controlado por instrumentos indicadores e transmissores que permitem aos operadores tomar ações mediante qualquer ocorrência do processo.

Uma particularidade desta etapa é a forma de quantificação do produto exportado para o cliente. Enquanto que no recebimento a quantidade de GLP é conhecida na origem e confirmada após o término da operação, na expedição a

quantificação é realizada através de diversos instrumentos periodicamente calibrados utilizando padrões validados por órgão credenciado ao INMETRO e pertencentes à Rede Brasileira de Calibração (RBC), uma vez que a quantidade volumétrica varia conforme as características de pressão e temperatura. Desta forma, o processo do faturamento do produto torna-se preciso e exato.



**Figura 16** – Esquemático representativo da retirada de GLP  
Fonte: Autoria própria

### 3.3. Estocagem do GLP

Por fim, a etapa de estocagem finaliza os processos que serão avaliados neste trabalho. Nesta fase, é importante observar que o GLP no estado líquido, seja ele pressurizado ou refrigerado, deve ser mantido dentro das condições de projeto da planta industrial para que se tenha a máxima eficiência e a estabilidade completa do processo.

Como já visto anteriormente, quando o produto está no estado pressurizado, as mudanças físicas provocadas pela interação com o ambiente externo e com o processo são pequenas e pouco influencia no processo como um todo. No entanto,

quando se trata do GLP no estado refrigerado, a vaporização do produto no interior dos tanques causa o aumento da pressão interna e que, quando não controlada a tempo, pode levar o processo à instabilidade.

Quando o tanque está recebendo produto (etapa de importação), parte desta vaporização retorna ao modal através do sistema de retorno de vapor. Entretanto, quando o tanque está parado, retirando produto (etapa de exportação) e até mesmo na fase de recebimento para complementar o sistema de retorno de vapor, é preciso utilizar unidades de compressores e trocadores de calor para transformar este vapor em líquido refrigerado. Estas unidades são conhecidas como unidades de condensação e, principalmente durante a fase de estocagem, são responsáveis por controlar a pressão e temperatura interna aos tanques, garantindo a estabilidade do processo.

As unidades de condensação são bastante complexas, sendo formadas por compressores com dois estágios, trocadores de calor e um conjunto de válvulas, sendo uma válvula de controle instalada no final da unidade responsável por provocar um processo de expansão do gás, resultando em sua perda imediata de temperatura e conseqüente transformação para o estado líquido.

O esquemático que representa a fase de estocagem é apresentado na Figura 17. Pelo motivo da complexidade deste processo estar relacionada com o GLP na fase refrigerada, o esquemático somente retrata esta parte do processo.



**Figura 17** – Esquemático representativo da estocagem de GLP  
Fonte: Autoria própria

### 3.4. Configurações de Estudo

O foco deste estudo é quantificar a confiabilidade do sistema considerando as configurações citadas e a inter-relação entre elas. Assim, tanto os processos de recebimento, expedição e estocagem terão seus dados de confiabilidade encontrados, bem como as etapas conjuntas de recebimento e estocagem; e expedição e estocagem.

Ainda com relação às fases, será considerada uma hipótese teórica na qual todas as etapas apresentadas estão ocorrendo ao mesmo tempo. Deste modo, o mesmo tanque que está recebendo o produto, está expedindo GLP refrigerado e o processo associado à estocagem também está ocorrendo. Esta operação é conhecida como “operação pulmão”.

Nas simulações realizadas, será considerado o quantitativo completo dos compressores, trocadores de calor, tubulações e demais equipamentos considerados importantes para as análises de confiabilidade que foram realizados nos softwares Weibull++ e BlockSim, ambos pertencentes ao grupo Reliasoft.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise dos resultados, serão apresentados os modelos de confiabilidade obtidos dos equipamentos objeto deste estudo, as configurações de confiabilidade dos mesmos e os resultados quantitativos obtidos do *software* para os processos implementados. Desta forma, foi possível quantificar os valores de confiabilidade dos processos e determinar suas virtudes e pontos de melhoria, alcançando o objetivo deste trabalho.

Com a exposição da motivação, do contexto operacional no qual se baseia este trabalho e da teoria de confiabilidade aplicada, entra-se na etapa da modelagem estatística dos equipamentos associados ao processo na planta industrial de GLP. A primeira etapa deste capítulo consistirá na definição dos modelos de confiabilidade dos equipamentos com base nas informações obtidas no software de Gestão. Na segunda etapa serão definidas as configurações operacionais que serão analisadas, conforme apresentado no Capítulo 2, e mostrado a relação de confiabilidade entre os equipamentos por meio de um diagrama de blocos. Por fim, na terceira etapa apresentar-se-ão os resultados das simulações computacionais executadas que servirão de base para as conclusões elaboradas neste trabalho.

### 4.1. Modelos de Confiabilidade

Neste item serão apresentados os tempos entre falhas de cada equipamento, ou o tempo de operação, obtidos no Sistema SAP. É importante destacar que entre todos os dados coletados, somente foram considerados àqueles que provocam a perda da função do equipamento, sendo descartadas as informações que não contribuem com o modelo de confiabilidade.

#### 4.1.1. Unidades de Condensação

Há quatro unidades de condensação existentes na planta. A Figura 18 mostra fisicamente esta unidade. Os elementos desta unidade considerados para a

elaboração do modelo de confiabilidade foram os permutadores, o compressor, o vaso atmosférico e os elementos de segurança que ocasionam a parada do equipamento. A Tabela 1 mostra os dados considerados e a Tabela 2 mostra os parâmetros obtidos para o modelo utilizando o software Weibull++.



**Figura 18** – Unidade de condensação  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 1** – Unidade de condensação – Dados obtidos do SAP  
Fonte: Autoria própria

Unidade de Condensação	Tempo entre falhas (horas)							
<b>Unidade A</b>	744	840	888	912	912	936	1008	1056
	1176	1248	1296	1296	1440	1464	1536	1680
	1680	1752	1752	1800	1800	1848	1968	1968
	2160	2160	2304	2328	2616	2640	2712	3288
	3336	4056	4056					
<b>Unidade B</b>	792	840	840	864	888	1104	1128	1248
	1248	1272	1320	1512	1536	1632	1728	1800
	1848	1920	2208	2424	2424	2448	2592	2616
	2616	2688	2952	3120	3888	6336	8040	

	816	816	864	864	888	888	912	912
<b>Unidade C</b>	936	984	1080	1152	1200	1224	1248	1392
	1608	1608	1656	1776	1968	2136	2184	2280
	2880	3048	3552	4152	4272	7608		
	840	840	864	888	888	936	960	1008
<b>Unidade D</b>	1200	1224	1224	1248	1248	1344	1368	1392
	1416	1632	1632	1656	1776	1920	2160	2208
	2256	2304	2472	2520	3072	3072	6768	

**Tabela 2 – Unidade de condensação – Parâmetros de confiabilidade**  
Fonte: Autoria própria

<b>Unidade de Condensação</b>	<b>Parâmetro <math>\beta</math></b>	<b>Parâmetro <math>\eta</math> (horas)</b>
<b>Unidade A</b>	2,44	2016,1
<b>Unidade B</b>	1,61	2469,7
<b>Unidade C</b>	1,52	2130,9
<b>Unidade D</b>	1,76	1985,7

#### 4.1.2. Unidades de Refrigeração

Com relação às unidades de refrigeração, elas têm a mesma função das unidades de condensação, com a diferença de possuir um estágio adicional de troca térmica, a qual permite uma maior capacidade de condicionar os tanques refrigerados de GLP. Na planta analisada, há três destas unidades. A Figura 19 apresenta a imagem destes equipamentos.

Os elementos desta unidade considerados para a elaboração do modelo de confiabilidade foram os mesmos que os considerados nas unidades de condensação, sendo que há equipamentos adicionais, como compressores e

permutadores, neste caso. A Tabela 3 mostra os dados considerados e a Tabela 4 mostra os parâmetros obtidos para o modelo utilizando o software Weibull++.

Durante a obtenção dos dados, as informações relativas à Unidade A se mostraram bastante incompletas e os resultados obtidos para o modelo de confiabilidade foram muito diferentes das demais unidades. Foi consultado o corpo técnico mais experiente da planta e os mesmos também discordaram dos resultados. Por este motivo, somente será apresentada os dados das Unidades B e C e, na etapa de simulação, o modelo da Unidade A será considerado igual ao da Unidade B.



**Figura 19** – Unidade de refrigeração  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 3** – Unidade de refrigeração – Dados obtidos do SAP  
Fonte: Autoria própria

Unidade de Refrigeração	Tempo entre falhas (horas)							
		696	720	720	744	768	792	792
	840	840	840	864	888	912	1008	1008
<b>Unidade B</b>	1032	1032	1056	1056	1080	1080	1104	1128
	1152	1224	1320	1344	1368	1440	1512	1560
	1608	1680	1752	1896	2040	2136	2184	2352
	3240	4536						

	720	720	744	792	840	888	936	936
	960	984	1032	1032	1080	1104	1104	1104
<b>Unidade C</b>	1200	1248	1248	1296	1296	1344	1368	1560
	1680	1680	1680	1824	1824	2136	2232	2400
	2472	2592	2832	2856	4056			

**Tabela 4** – Unidade de refrigeração – Parâmetros de confiabilidade  
Fonte: Autoria própria

<b>Unidade de Refrigeração</b>	<b>Parâmetro <math>\beta</math></b>	<b>Parâmetro <math>\eta</math> (horas)</b>
<b>Unidade B</b>	1,97	1516,6
<b>Unidade C</b>	2,18	1711,3

#### 4.1.3. Unidades Sopradores

As unidades sopradores têm a função de retirar o vapor interno dos tanques refrigerados e enviá-los para o navio durante a descarga de GLP, contribuindo para diminuir a pressão interna dos tanques e aumentar a vazão de descarga do navio. A Figura 20 apresenta a imagem destes equipamentos. Os elementos desta unidade considerados para a elaboração do modelo de confiabilidade foi o compressor, o vaso atmosférico e os elementos de segurança que ocasionam a parada do equipamento. A

Tabela 5 mostra os dados considerados e a Tabela 6 mostra os parâmetros obtidos para o modelo utilizando o software Weibull++.



**Figura 20 – Unidade soprador**  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 5 – Unidade soprador – Dados obtidos do SAP**  
Fonte: Autoria própria

Unidade Soprador	Tempo entre falhas (horas)							
		912	1032	1152	1152	1200	1296	1368
<b>Unidade A</b>	1680	1728	1728	2640	2712	3384	3744	4656
	5304	5976	6192	6552	7896			
	840	840	840	864	888	1128	1200	1392
<b>Unidade B</b>	2256	2688	3408	3528	3552	4008	5904	5928
	6000	6816	9528					

**Tabela 6 – Unidade soprador – Parâmetros de confiabilidade**  
Fonte: Autoria própria

Unidade Soprador	Parâmetro $\beta$	Parâmetro $\eta$ (horas)
<b>Unidade A</b>	1,53	3408,0
<b>Unidade B</b>	1,35	3555,4

#### 4.1.4. Bombas de GLP Refrigerado

As bombas de GLP refrigerado retiram o produto dos tanques e o envia para as esferas pressurizadas, passando pelos permutadores. A Figura 21 apresenta fisicamente estes equipamentos. Os elementos desta unidade considerados para a elaboração do modelo de confiabilidade foram as próprias bombas e os elementos de segurança que ocasionam a parada do equipamento. A Tabela 7 mostra os dados considerados e a Tabela 8 mostra os parâmetros obtidos para o modelo utilizando o software Weibull++.



**Figura 21** – Bombas de GLP refrigerado  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 7** – Bombas de GLP refrigerado – Dados obtidos do SAP  
Fonte: Autoria própria

Bombas de GLP Refrig.	Tempo entre falhas (horas)							
	840	1008	1032	1104	1128	1176	1368	1464
<b>Bomba A</b>	1800	1848	1872	2112	2424	2448	2472	2616
	3768	3816	4416	4488	5232	5256	7416	

<b>Bomba B</b>	816	864	888	1056	1080	1080	1200	1344
	1416	1608	1608	1728	1776	1848	1944	2088
	2256	2424	2760	2928	3072	3576	3672	4488
	6504							
<b>Bomba C</b>	984	1008	1056	1056	1152	1176	1200	1224
	1368	1464	1512	1584	1728	1872	2016	2232
	2472	2472	2664	2688	2832	2904	3024	3552
	4800	8040						

**Tabela 8** – Bombas de GLP refrigerado – Parâmetros de confiabilidade  
Fonte: Autoria própria

<b>Bombas de GLP Refrig.</b>	<b>Parâmetro <math>\beta</math></b>	<b>Parâmetro <math>\eta</math> (horas)</b>
<b>Bomba A</b>	1,69	3001,4
<b>Bomba B</b>	1,81	2450,5
<b>Bomba C</b>	1,69	2528,1

#### 4.1.5. Bombas de GLP Pressurizado

As bombas de GLP pressurizado são responsáveis pela expedição do produto das esferas para os clientes do Terminal. A

Figura 22 apresenta fisicamente estes equipamentos. Assim como nas bombas de GLP refrigerado, os elementos desta unidade considerados para a elaboração do modelo de confiabilidade foram as próprias bombas e os elementos de segurança que ocasionam a parada do equipamento. A Tabela 9 mostra os dados considerados e a Tabela 10 mostra os parâmetros obtidos para o modelo utilizando o software Weibull++.



Figura 22 – Bombas de GLP pressurizado  
Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Bombas de GLP pressurizado – Dados obtidos do SAP  
Fonte: Autoria própria

Bombas de GLP Pressur.	Tempo entre falhas (horas)							
<b>Bomba A</b>	792	840	864	888	888	984	1008	1032
	1176	1296	1344	1512	1800	1848	1920	1992
	2376	2616	2616	2808	2904	2928	3672	3840
	4752	5640						
<b>Bomba B</b>	720	984	1464	1632	1656	1992	1992	2016
	2184	2352	2640	3192	3432	4056	4176	4344
	4560	4800	5616	6624				
<b>Bomba C</b>	768	1008	1128	1464	2112	2448	2496	2520
	2640	3576	4104	5688	6168	6456	7200	8784

**Tabela 10** – Bombas de GLP pressurizado – Parâmetros de confiabilidade  
Fonte: Autoria própria

Bombas de GLP Pressur.	Parâmetro $\beta$	Parâmetro $\eta$ (horas)
Bomba A	1,79	2367,7
Bomba B	2,04	3424,0
Bomba C	1,60	4101,7

#### 4.1.6. Permutadores

Na planta analisada, há sete permutadores, sendo que as últimas três unidades foram instaladas no ano de 2008. Estes equipamentos têm a função de aquecer o GLP refrigerado para transformá-lo em GLP pressurizado, o qual é expedido do Terminal. A Figura 23 apresenta a imagem destes equipamentos. Por serem elementos mais simples, somente o próprio equipamento foi considerado para a elaboração do modelo de confiabilidade. A Tabela 11 mostra os dados considerados e a Tabela 12 mostra os parâmetros obtidos para o modelo utilizando o software Weibull++.



**Figura 23** – Permutadores  
Fonte: Autoria própria

**Tabela 11 – Permutadores – Dados obtidos do SAP**  
 Fonte: Autoria própria

<b>Permutadores</b>	<b>Tempo entre falhas (horas)</b>							
<b>Permutador A</b>	264	288	336	408	504	624	816	1008
	1056	1152	1416	1488	1512	1536	1656	1656
	1704	1848	1872	2016	2520	2688	3168	3408
	3600	3792	3888	4008	4032	4872	5568	8184
<b>Permutador B</b>	264	360	408	504	552	552	936	936
	1008	1056	1296	1848	2160	2232	2280	2352
	2856	3336	3432	4152	4464	4800	6504	7056
	8544							
<b>Permutador C</b>	288	528	600	648	648	672	816	840
	960	984	1200	1272	1368	1464	1704	1920
	2712	2784	2976	3384	4368	4584	6936	7056
	7536	8544						
<b>Permutador D</b>	288	360	504	792	816	1008	1176	1176
	1440	1656	1776	2088	2136	2280	2592	2904
	3192	3504	4560	5112	5832	6936	7272	
<b>Permutador E</b>	288	1008	1104	1464	1848	2184	2232	2448
	2952	4032	5472	9576	9744			
<b>Permutador F</b>	384	912	912	1272	1944	2496	2520	2712
	4224	5544	6936	7248				
<b>Permutador G</b>	312	504	1680	1680	3288	3864	7608	9408
	9528							

**Tabela 12 – Permutadores – Parâmetros de confiabilidade**  
 Fonte: Autoria própria

<b>Permutadores</b>	<b>Parâmetro <math>\beta</math></b>	<b>Parâmetro <math>\eta</math> (horas)</b>
<b>Permutador A</b>	1,34	2488,3
<b>Permutador B</b>	1,17	2702,1

---

<b>Permutador C</b>	1,13	2698,5
<b>Permutador D</b>	1,31	2811,6
<b>Permutador E</b>	1,22	3655,9
<b>Permutador F</b>	1,38	3392,0
<b>Permutador G</b>	1,09	4337,3

---

## 4.2. Configurações Operacionais

Após obter os modelos de confiabilidade dos principais equipamentos do processo, faz-se necessário apresentar a relação de confiabilidade que há entre estes elementos. Assim, como apresentado no Capítulo 2, foram definidas as etapas de recebimento, expedição e estocagem de GLP para realizar a análise de confiabilidade e nos próximos itens serão apresentados os diagramas de blocos de confiabilidade completos de cada etapa e que serviram de bases para as simulações.

Para cada uma das etapas estudadas será apresentada uma configuração mínima de equipamentos que devem estar em operação para que o processo ocorra dentro de suas características nominais de estabilidade, vazão, temperatura e demais variáveis.

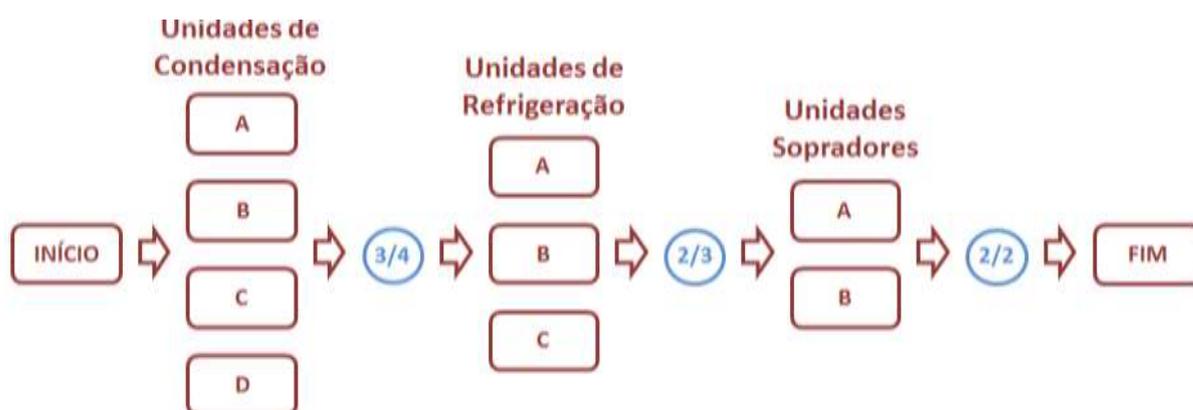
### 4.2.1. Recebimento de GLP

Na etapa de recebimento de GLP, os principais equipamentos envolvidos neste processo são as unidades de condensação, de refrigeração e os sopradores. Através da análise do processo, foi definida como configuração mínima deste processo a operação dos seguintes equipamentos:

- 3 Unidades de condensação;
- 2 Unidades de refrigeração;

- 2 Unidades sopradores.

Para as unidades de condensação e refrigeração há uma relação baseada na configuração k-de-n, sendo 3-de-4 e 2-de-3, respectivamente. Já para a unidade sopradores, a relação é em série, pois ambas as unidades devem estar operacionais para garantir a operação proposta. A Figura 24 ilustra o diagrama de blocos de confiabilidade utilizado para representar este processo.



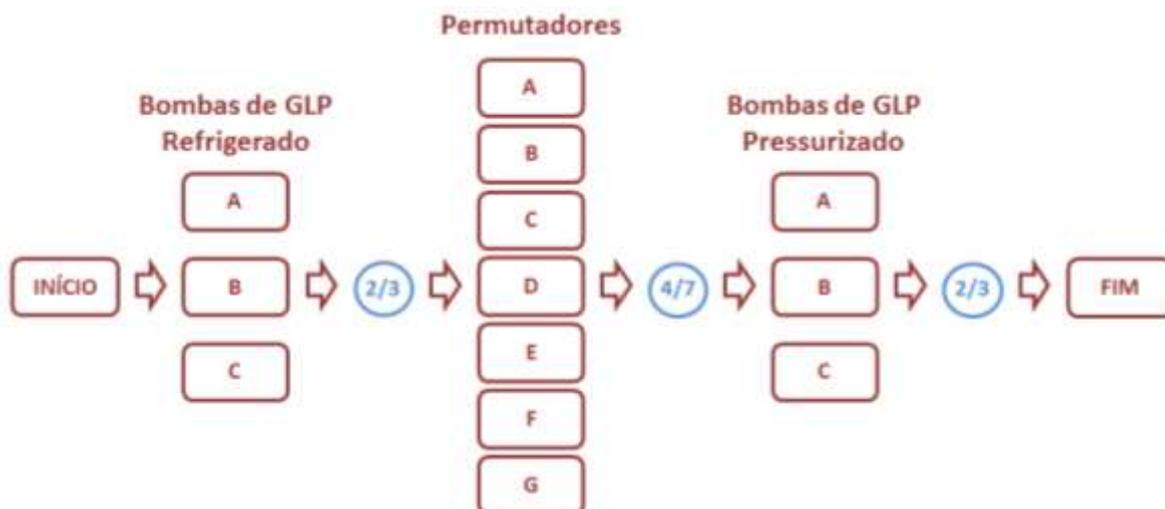
**Figura 24** – Recebimento – Diagrama de Blocos de Confiabilidade  
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2. Expedição de GLP

Na etapa de expedição de GLP, os principais equipamentos envolvidos neste processo são as bombas de GLP refrigerado, permutadores e bomba de GLP pressurizado. Através da análise do processo, foi definida como configuração mínima deste processo a operação dos seguintes equipamentos:

- 2 Bombas de GLP refrigerado;
- 4 Permutadores;
- 2 Bombas de GLP pressurizado.

Para todas as unidades há uma relação baseada na configuração k-de-n, sendo 2-de-3 para as bombas e 4-de-7 para os permutadores. A Figura 25 ilustra o diagrama de blocos de confiabilidade utilizado para representar este processo.



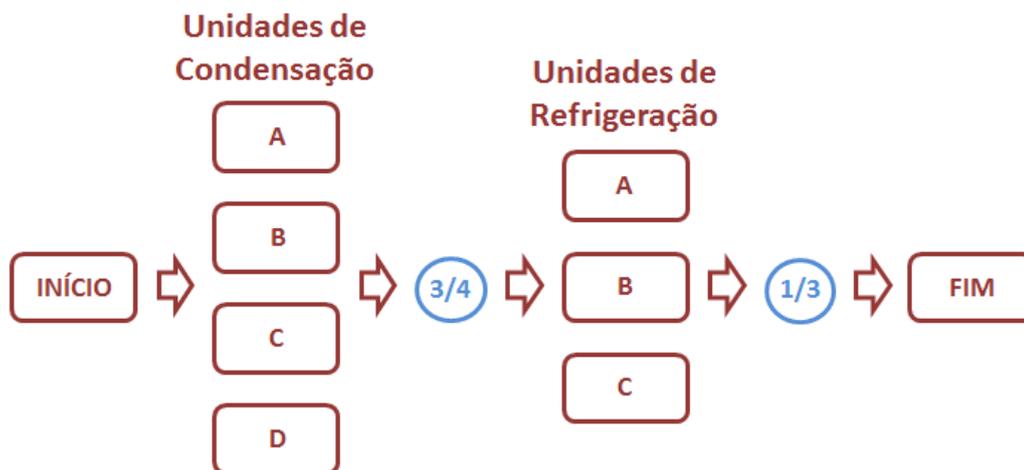
**Figura 25** – Expedição – Diagrama de Blocos de Confiabilidade  
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.3. Estocagem de GLP

Na etapa de estocagem de GLP, os principais equipamentos envolvidos neste processo são as unidades de condensação e de refrigeração. Através da análise do processo, foi definida como configuração mínima deste processo a operação dos seguintes equipamentos:

- 3 Unidades de condensação;
- 1 Unidade de refrigeração.

Pode-se observar que a processo de estocagem envolve as unidades de condensação e refrigeração, tal como o processo de recebimento. No entanto, pela configuração mínima de equipamentos operacionais ser menor para a estocagem, este processo é menos crítico. Para as unidades de condensação, a configuração de confiabilidade é 3-de-4, enquanto que para as unidades de refrigeração, a configuração é 1-de-3. A Figura 26 ilustra o diagrama de blocos de confiabilidade utilizado para representar este processo.



**Figura 26** – Estocagem – Diagrama de Blocos de Confiabilidade  
 Fonte: Autoria própria

### 4.3. Simulações

Com o término da parte de modelagem dos equipamentos do processo e a relação de confiabilidade que os mesmos apresentam para o atendimento dos objetivos da planta industrial, faz-se necessário executar as simulações dos cenários de recebimento, expedição e estocagem de GLP. A partir destas informações, será possível analisar os equipamentos, processos e a planta sob o ponto de vista da confiabilidade, identificando os principais pontos fracos do processo e propondo melhorias para o aumento da confiabilidade dos mesmos.

Os tempos utilizados como referência para o cálculo da confiabilidade foram 1, 2 e 3 meses (720, 1440 e 2160 em horas), uma vez que a demanda de GLP aumenta significativamente durante o período de inverso.

#### 4.3.1. Recebimento de GLP

Os resultados de confiabilidade obtidos para o processo de recebimento de GLP são apresentados na Tabela 13. A Tabela é composta pelas informações de tempo, da confiabilidade individual dos equipamentos e pela confiabilidade total do processo.

**Tabela 13 – Recebimento – Resultados da simulação**  
 Fonte: Autoria própria

<b>Tempo (horas)</b>	<b>Confiabilidade</b>			<b>Processo Total</b>
	<b>Unidades de Condensação</b>	<b>Unidades de Refrigeração</b>	<b>Unidades Sopradores</b>	
<b>720</b>	0,912	0,912	0,812	0,675
<b>1440</b>	0,494	0,407	0,570	0,115
<b>2160</b>	0,131	0,062	0,365	0,003

Analisando a tabela, chega-se a conclusão que em três meses o processo de recebimento sofrerá alguma restrição de vazão, sendo as unidades de refrigeração e de condensação, respectivamente, as principais responsáveis por esta limitação.

Com relação ao primeiro mês, as unidades individualmente apresentam uma confiabilidade alta, pois nos modelos encontrados não foram obtidos significativos tempos de operação inferiores a 720 horas. No entanto, quando se verifica a transição para o segundo mês, os valores de confiabilidade caem abruptamente e o valor para o processo total atinge 11,5%. Para o terceiro mês, a tendência de queda continua e o valor da confiabilidade para o processo total chega a 0,3%.

#### 4.3.2. Expedição de GLP

Os resultados de confiabilidade obtidos para o processo de expedição de GLP são apresentados na

Tabela 14. A Tabela é composta pelas informações de tempo, da confiabilidade individual dos equipamentos e pela confiabilidade total do processo.

**Tabela 14** – Expedição – Resultados da simulação

Fonte: Autoria própria

Tempo (horas)	Confiabilidade			
	Bombas GLP Refrigerado	Permutadores	Bombas GLP Pressurizado	Processo Total
<b>720</b>	0,972	0,986	0,987	0,946
<b>1440</b>	0,789	0,838	0,881	0,583
<b>2160</b>	0,490	0,548	0,657	0,176

Através da observação da tabela, já é possível identificar que o processo de expedição apresenta maior grau de confiabilidade que o processo de recebimento. De uma maneira geral, os equipamentos apresentam um grau de confiabilidade aceitável até o segundo mês de operação, diferentemente do processo de recebimento.

Analisando cada período individualmente, é observado que no primeiro mês de operação o processo apresenta confiabilidade de 94,6%, motivada pelo alto grau de confiabilidade dos equipamentos associados a este processo. No segundo mês, apesar da confiabilidade do processo ter caído para menos de 60%, a confiabilidade individual dos equipamentos continua em valores razoáveis próximos ou superiores a 80%. Já para o terceiro mês, os valores caem significativamente, em concordância com a característica dos equipamentos individuais e a confiabilidade do processo atinge o valor de 17,6%.

#### 4.3.3. Estocagem de GLP

Os resultados de confiabilidade obtidos para o processo de estocagem de GLP são apresentados na Tabela 15. A Tabela é composta pelas informações de tempo, da confiabilidade individual dos equipamentos e pela confiabilidade total do processo.

**Tabela 15 – Estocagem – Resultados da simulação**  
 Fonte: Autoria própria

<b>Tempo (horas)</b>	<b>Confiabilidade</b>		
	<b>Unidades de Condensação</b>	<b>Unidades de Refrigeração</b>	<b>Processo Total</b>
<b>720</b>	0,912	0,993	0,906
<b>1440</b>	0,494	0,824	0,407
<b>2160</b>	0,131	0,389	0,051

Com relação ao processo de estocagem, tem-se que este cenário envolve os mesmos equipamentos do processo de recebimento, porém com uma criticidade menor, uma vez que tolera um número maior de equipamentos fora de operação para cumprir o seu objetivo. Desta forma, a análise se torna a mesma que a apresentada no item 4.3.1, sendo o segundo mês o marco no qual a confiabilidade do processo cai significativamente e, no terceiro mês atinge o valor de 5,1%.

## 5. CONCLUSÕES

Inicialmente, este trabalho apresentou os processos de recebimento, expedição e estocagem de GLP de uma planta industrial, avaliando os principais equipamentos relacionados aos mesmos e mostrando as inter-relações entre eles tanto do ponto de vista do processo, como sob a ótica da teoria de confiabilidade. Para fundamentar o estudo realizado, foram introduzidas as teorias de análise de dados de vida e diagrama de blocos e, em seguida, foi apresentada toda a modelagem de confiabilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, dos processos analisados.

É importante ressaltar que os resultados obtidos neste estudo consideraram os equipamentos como não reparáveis (simulação analítica), ou seja, uma vez fora de operação, o mesmo não volta para a análise de confiabilidade. Outro ponto de fundamental relevância é o tratamento dos dados coletados do software de gestão e a validação dos modelos de confiabilidade junto às pessoas mais experientes da planta. Por fim, é importante salientar que os dados obtidos consideraram que os equipamentos, quando reparados, voltavam a ser tão bom quanto novo (*as good as new*), o que permitiu a modelagem realizada.

Assim, os resultados obtidos mostraram que o processo de recebimento de GLP é o mais suscetível a falhas e a política de manutenção, com a priorização de frentes de trabalho sobre os equipamentos pertencentes a este processo, requer maior nível de automação e instrumentação para acompanhar o desempenho dos ativos de forma online e a elaboração de planos de manutenção preditivos e de sobressalentes que (itens críticos em estoque ou contratos de fornecimento fechados com fornecedores com prazos fixados) devem priorizar os elementos pertencentes a este processo.

Analisando o resultado individual dos equipamentos, conclui-se que todas as unidades analisadas do processo de recebimento, principalmente as unidades de refrigeração seguida das unidades de condensação, são as mais vulneráveis dentre os equipamentos pertencentes a este estudo.

## 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, é possível visualizar alguns pontos em que é possível aprofundar mais a pesquisa com o objetivo de se obter mais dados para a análise completa do processo. Assim, sugerem-se os seguintes horizontes de pesquisa para a continuidade deste trabalho:

- Obter os modelos de manutenibilidade dos equipamentos de forma a agregar esta informação ao modelo e, conseqüentemente, possibilitar a simulação dinâmica do mesmo com o objetivo de se obter a disponibilidade do sistema;
- Avaliar outros processos igualmente importantes na área de GLP, ou do setor petroquímico, a fim de se utilizar as informações de confiabilidade para auxiliar na tomada de decisão ou definição de estratégias.

## REFERÊNCIAS

Billinton, R.; Allan, R. N. "*Reliability Evaluation of Engineering Systems*", London: Plenum Press. 1983.

Henderson, W. O. "*A Revolução Industrial: 1780-1914*". São Paulo, Editora Verbo e Editora da USP, 1979.

Hobsbawn, E. J. "*A era das revoluções: Europa 1789 - 1848*", Tradução de M. T. L. Teixeira e M. Penchel, Rio de Janeiro, Editora Paz e Terra, 2007.

Iglésias, F. "*A Revolução Industrial*", São Paulo, Editora Brasiliense, 1981.

Kuo, W.; Zuo, M. J. "*Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*", New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

O'Connor, P. D. T. "*Practical Reliability Engineering*", John Wiley & Sons – 4th Edition, 2002.

Recuero, R. C. "*A internet e a nova revolução na comunicação mundial*", Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Pelotas, 2000.

Reliasoft Brasil, "Engenharia da Confiabilidade", Material didático e Apresentação de autoria da empresa ReliaSoft Brasil, Copyright 1992-2001.

Reliasoft Brasil, "Resumo Teórico: Engenharia da Confiabilidade", Material didático e Apresentação de autoria da empresa ReliaSoft Brasil, Copyright 1992-2001.