

Análise de confiabilidade de grua automável portuária

Oberdan Carrasco Nogueira¹, Mauro de Vasconcellos Real²

*¹ Mestrando do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS –
oberdan.carrasco@ibest.com.br*

² Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – mauro@dmc.furg.br

RESUMO: o trabalho tem como objetivo realizar modelagem estatística do comportamento de falhas em função do tempo da Grua Automável Portuária Gottwald modelo HMK 280 E, propondo sugestões de melhorias visando o aumento da confiabilidade do equipamento. Primeiramente efetuou-se a análise dos Indicadores de Desempenho do setor de Manutenção, visando identificar quais equipamentos apresentam menores índices de Disponibilidade. Após análise, definiu-se como equipamento piloto a Grua Automável Gottwald, por apresentar maior Índice de Indisponibilidade. Após o correto entendimento do funcionamento do equipamento, realizou-se a análise dos dados de paradas corretivas, classificando as reais causas em função de seus subsistemas e modelando o comportamento de falhas de cada subsistema, e posteriormente, do equipamento, obtendo-se seus Indicadores de Performance. Em posse destes, realizaram-se simulações do sistema após a melhoria da Confiabilidade do subsistema crítico, chegando finalmente na estimativa de aumento na quantidade de movimentações de Containeres e nas melhorias propostas para que se consiga atingir esse aumento.

PALAVRAS CHAVES: Indisponibilidade, Diagrama de Blocos, Simulação, Movimentações, Curva da Banheira

ABSTRACT: the project has the objective to realize the Statistics Failures Models in function of time of the Mobile Harbour Crane Gottwald model HMK 280 E, actually in operation at TECON in Rio Grande, proposing improvements suggestions to the growth of Reliability of the equipment. Primely, realize the analysis of the Performance Indicators of maintenance department, identifying the equipments that had the worst indicators. After that, choice the Mobile Harbour Crane Gottwald, because of that it had the smallest availability. So, beginning to study of equipment's operations conditions and the separation it in subsystems. After, realize the analysis and model of times between failures and correctives maintenance for each subsystem and for the equipment, identifying his Probability Distributions and Performance Reliability Indicators. Having these Indicators, simulations were done about the behavior of the equipment after the Reliability improvement of the critical subsystem, obtaining finally the estimative of growth of the containers movements and the improvements proposed to get this growth.

KEYWORDS: Non-availability, Blocks Diagram, Simulation, Movements, Bathtub Curve

1. INTRODUÇÃO

O Terminal de Containeres de Rio Grande (TECON) possui atualmente em operação 5 equipamentos para a movimentação de containeres em seu cais - que atualmente possui 2 berços permitindo a atracação e 2 navios de grande porte simultaneamente - dois Portainers e três Gruas Automóveis Portuárias, responsáveis por todo o fluxo de containeres dos navios para o solo e vice-versa. Verificou-se através da análise do processo de movimentação de containeres que estes equipamentos apresentam maior criticidade para o processo produtivo. Devido a este fato, se decidiu efetuar a análise dos Indicadores de Desempenho gerados mensalmente pelo setor de Manutenção da empresa, em especial os dados de Indisponibilidade relativos aos equipamentos de cais, no período de janeiro a outubro de 2007. Os dados de indisponibilidade destes equipamentos estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Índices de Indisponibilidade dos Equipamentos de Cais
Período: Janeiro a Outubro de 2007

<i>TAG</i>	<i>Descrição do Equipamento</i>	<i>Índice de Indisponibilidade Média (%)</i>
GM-01	Grua Automóvel Portuária 1	5,9
GM-02	Grua Automóvel Portuária 2	5,7
GM-03	Grua Automóvel Portuária 3	4,1
PP-01	Ponte Portuária 1	4,7
PP-02	Ponte Portuária 2	4,2

Observa-se que o equipamento de maior Índice de Indisponibilidade no período analisado é o correspondente a Grua Automóvel Portuária 1. Esta constatação fez com que se iniciasse o trabalho de Análise de Confiabilidade por este equipamento, com o objetivo de mapear os principais problemas ocorridos no equipamento e modelar seu comportamento de falhas, propondo soluções para o aumento da confiabilidade e disponibilidade do mesmo.

2. ANÁLISE E METODOLOGIA

2.1. O Equipamento

O equipamento em estudo é uma Grua Automóvel Portuária de fabricante Gottwald, modelo HMK 280 E, fabricada em 1997, segundo Gottwald Demag [4], com capacidade de movimentação média de aproximadamente 12 containeres por hora, considerando as condições operacionais específicas do TECON (obtido através de análise de movimentações apresentadas em relatórios de operações). A tabela 2 apresenta as principais especificações técnicas do equipamento.

Tabela 2 – Principais Especificações Técnicas do equipamento

<i>Componente</i>	<i>Especificação</i>	<i>Detalhes</i>
Motor Diesel	Detroit Diesel tipo 16C92T	16 cilindros em V, potência 630 KW/1800 rpm
Gerador	Marca AEG tipo DKBL 4405/04F	440V / 60 Hz
Nº série	128.238.00	
Inclinação Superável	Max. 2,5%	
Inclinação Lateral em Translação	Max. 2,5%	
Raio de viragem exterior	17,2 metros	

A Grua automóvel e seus subsistemas estão apresentados na Figura 1, extraída do manual do equipamento Gottwald Demag [3].

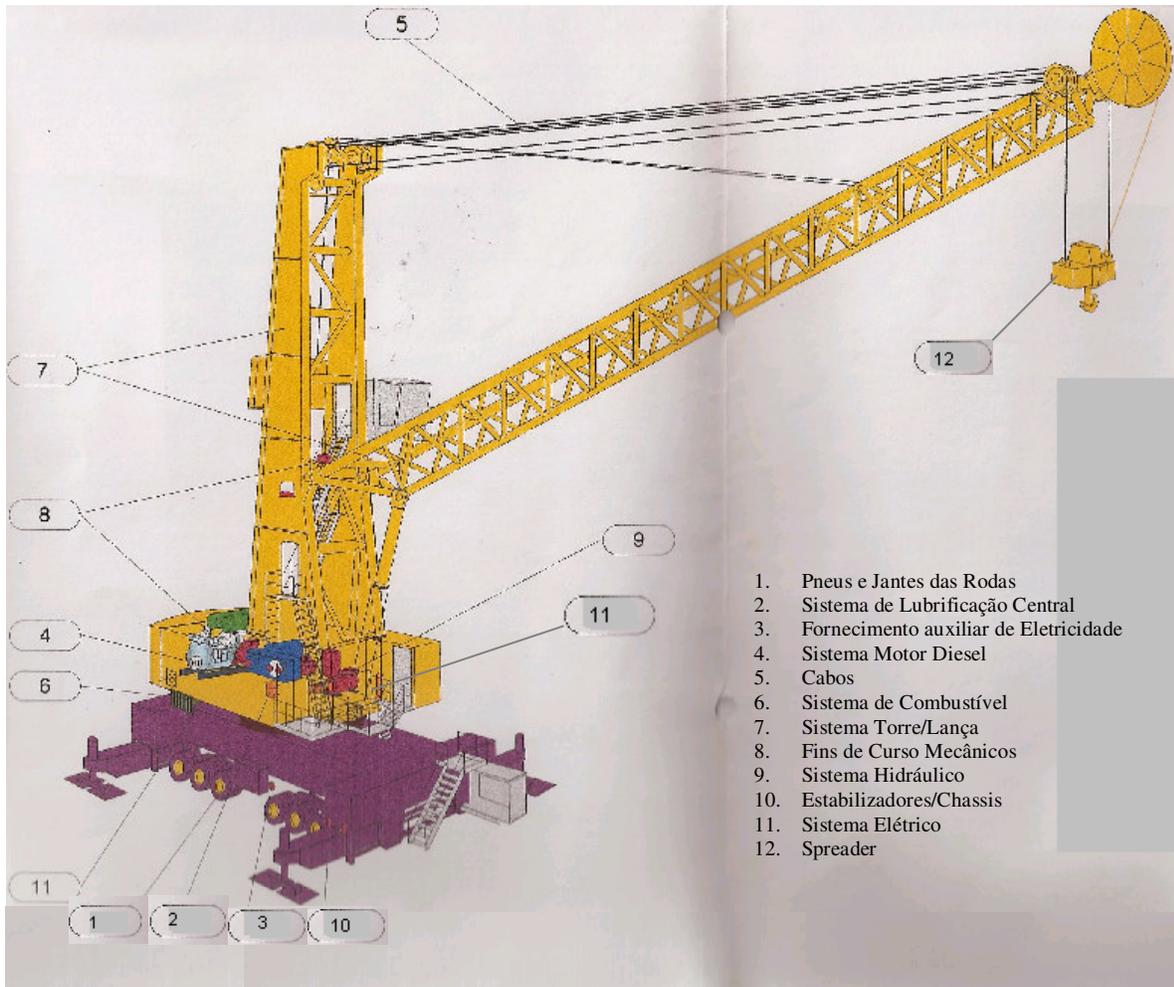


Figura 1 – Subsistemas que compõem a Grua Automóvel Portuária

As figuras 2 e 3 mostram o referido equipamento em operação.



Figura 2 – Grua Automóvel Portuária em Operação



Figura 3 – Grua Automóvel Portuária em Operação

A seguir estão descritos os subsistemas que compõem o equipamento.

2.1.1. Pneus e Jante de Rodas

Responsável pelo deslocamento do equipamento ao longo do cais e posicionamento do mesmo para operação.

2.1.2. Sistema de Lubrificação Central

Responsável pela Lubrificação das principais partes móveis do equipamento.

2.1.3. Fornecimento auxiliar de Eletricidade

Sistema utilizado sempre que o sistema de motor diesel não está operante, através do qual é realizada a alimentação de energia elétrica do equipamento, permitindo que o mesmo execute suas funções.

2.1.4. Sistema Motor Diesel

Sistema composto basicamente por motor diesel acoplado a um gerador de energia elétrica, responsável pelo suprimento de energia elétrica para todo o equipamento.

2.1.5. Cabos

Utilizado para o içamento e posicionamento dos containeres em solo e a bordo das embarcações.

2.1.6. Sistema de Combustível

Responsável pelo suprimento de combustível para o Sistema Motor Diesel, permitindo que o mesmo mantenha o equipamento suprido de energia elétrica.

2.1.7. Sistema Torre/Lança

Opera em conjunto com os cabos no içamento e movimentação de containeres em solo e no interior das embarcações.

2.1.8. Fins de Curso Mecânicos

Sistema de segurança sobressalente, que entra em operação nos casos de falha dos sistemas de fim de curso elétricos

2.1.9. Sistema Hidráulico

Um dos subsistemas mais importantes da Grua Automóvel, o Sistema Hidráulico é composto por vários equipamentos com funções específicas, que podem ser desde o deslocamento do equipamento em terra, por meio de motores hidráulicos que acionam o sistema de rodas, até a estabilidade e transmissão de força por meio de cilindros hidráulicos, que operam em conjunto com os cabos e com o Sistema Torre/Lança na movimentação de containeres e na ancoragem do equipamento no solo durante a operação, através dos Estabilizadores.

2.1.10. Estabilizadores/Chassis

Conjunto responsável pela ancoragem do equipamento no solo durante a operação. Os estabilizadores são compostos por cilindros hidráulicos e estruturas metálicas, que são posicionadas de tal forma que o equipamento se mantenha estável durante a movimentação de containeres.

2.1.11. Sistema Elétrico

Sistema de extrema importância para o equipamento, o sistema elétrico é responsável pela alimentação de energia e controle do equipamento em sua totalidade. Este sistema é composto por todos os componentes elétricos e eletrônicos do equipamento, tais como sensores, controladores lógicos, fins de curso, etc.

2.1.12. Spreader

Mecanismo instalado na extremidade dos cabos de içamento, responsável pelo intertravamento do container ao sistema de cabos, além de efetuar a compensação e estabilidade do container durante sua movimentação, e liberação do mesmo depois de posicionado. O Spreader, juntamente com o Sistema Hidráulico, são os principais subsistemas da Grua, sendo que casos de falhas em ambos os componentes acarreta na parada total do equipamento.

2.2. Análise de Confiabilidade e Modelagem do Sistema

Segundo Information Science Consultant [2] e Reliasoft [9], a distribuição de Weibull é uma das distribuições mais utilizadas na Engenharia de Confiabilidade. Devido a sua capacidade de mudar de forma dependendo da variação do parâmetro β , podendo modelar uma grande variedade de dados de vida. Esta distribuição de Probabilidade está sendo apresentada a seguir.

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (1), \text{ onde}$$

β : Parâmetro de forma

γ : Parâmetro de Localização

η : Parâmetro de escala

T: tempo (horas de operação)

Em função dos parâmetros de forma é possível identificar a fase em que o equipamento se encontra em termos de sua vida útil. Existem 3 fases distintas:

- ✓ Falhas Prematuras ou Mortalidade Infantil: falhas decorrentes ainda devido a problemas de projetos e start-up do equipamento. Nesta fase, a taxa de falhas do equipamento é decrescente.
- ✓ Período de Vida Útil: apresenta taxa de falhas constante, e corresponde ao período em que o equipamento apresenta apenas falhas aleatórias devido a problemas operacionais, falha humana, etc.
- ✓ Período de Final de Vida Útil: último estágio de comportamento da vida útil do equipamento, o qual apresenta taxa de falhas crescente, indicando o período de obsolescência do equipamento, sendo necessária intervenção para correção da taxa de falhas.

Estas 3 fases formam uma curva muito utilizada na manutenção, denominada “Curva da Banheira”, apresentada na figura 4, conforme apresentado por Aladon [1].

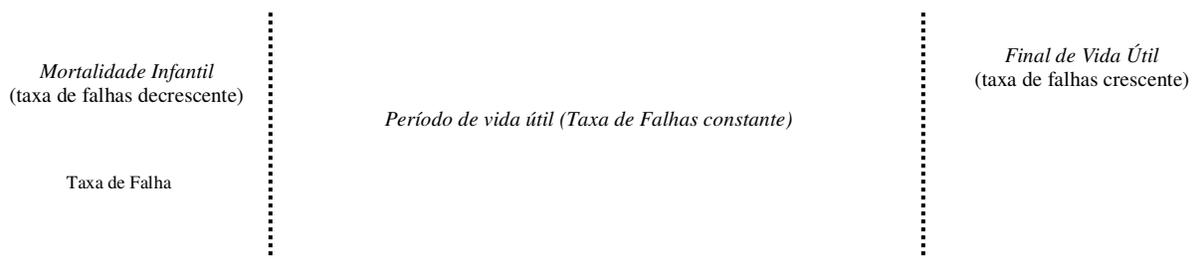




Figura 4 – Curva da Banheira

Levando a tabela 2 apresenta os tipos de distribuições de aproximação e de falha em função do parâmetro de forma, conforme descrito em Reliasoft [7].

Tabela 2 – Distribuições e tipos de falhas em função do parâmetro de forma

<i>Parâmetro de forma</i>	<i>Distribuição</i>	<i>Tipo de Falha</i>
1,0	Exponencial	Constante
1,0 a 2,5	Aprox. Lognormal	Crescente
2,5 a 3,0	Aprox. Normal	Crescente
>3,0	Weibull com pouca variabilidade	Crescente
<1,0	Semelhante a exponencial	Prematura

Para a realização da análise de confiabilidade do equipamento, se fez necessária à coleta e tratamento das informações de Manutenções Corretivas, registradas nos relatórios de turno dos manutentores, em particular os tempos entre falhas e as durações das mesmas, assim como as causas que levaram a ocorrência das paradas. Através destas informações, é possível identificar, para cada subsistema com o auxílio de software específico para esta finalidade, às distribuições do comportamento das falhas e da duração das mesmas, utilizando para isso a distribuição de Weibull.

Foram analisados relatórios de manutenção do equipamento do período compreendido entre julho e setembro de 2007. A tabela 3 apresenta os parâmetros das distribuições para cada subsistema do equipamento, quando aplicável, de acordo com Reliasoft [6].

Tabela 3 – Parâmetros das Distribuições de Weibull
Distribuições de Tempos até a Falha e de Manutenções Corretivas

<i>Subsistema</i>	<i>Tempo até a falha</i>			<i>Manutenção Corretiva</i>		
	<i>Beta</i>	<i>Gama</i>	<i>Eta</i>	<i>Beta</i>	<i>Gama</i>	<i>Eta</i>
Pneus e Jantes das Rodas	-	-	-	-	-	-
Sistema de Lubrificação Central	-	-	-	-	-	-
Fornecimento auxiliar de eletricidade	-	-	-	-	-	-
Sistema de Motor Diesel	0,2301	0,99	123,2116	2,2967	0	0,2692
Cabos	-	-	-	-	-	-
Sistema de Combustível	-	-	-	-	-	-
Sistema de Torre/Lança	-	-	-	-	-	-
Fins de Curso	-	-	-	-	-	-
Sistema Hidráulico	0,74	14,842	175,8115	1,0486	0,0718	0,2195
Chassis/Estabilizadores	-	-	-	-	-	-
Sistema elétrico	1,0079	0	59,5755	0,9039	0,0716	0,1610
Spreader (SP)	0,6858	0,3145	21,3277	1,3046	2,5475	0,0424

Através dos dados obtidos é possível verificar que os tempos de falhas do subsistema “Sistema

Elétrico” apresenta coeficiente de forma igual a 1,0 , o que já era de se esperar, visto que sistemas elétricos apresentam comportamento segundo Distribuição Exponencial (taxa de falha constante). É possível verificar também que os demais coeficientes de forma das distribuições de falha apresentam valores inferiores a 1,0, o que significa que as falhas ocorridas apresentam características de falhas prematuras com taxas de falhas decrescentes em função do tempo (mortalidade infantil), apresentado por Lafraia [5].

As figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam as funções densidade de probabilidade de cada subsistema em função do tempo (horas de operação).

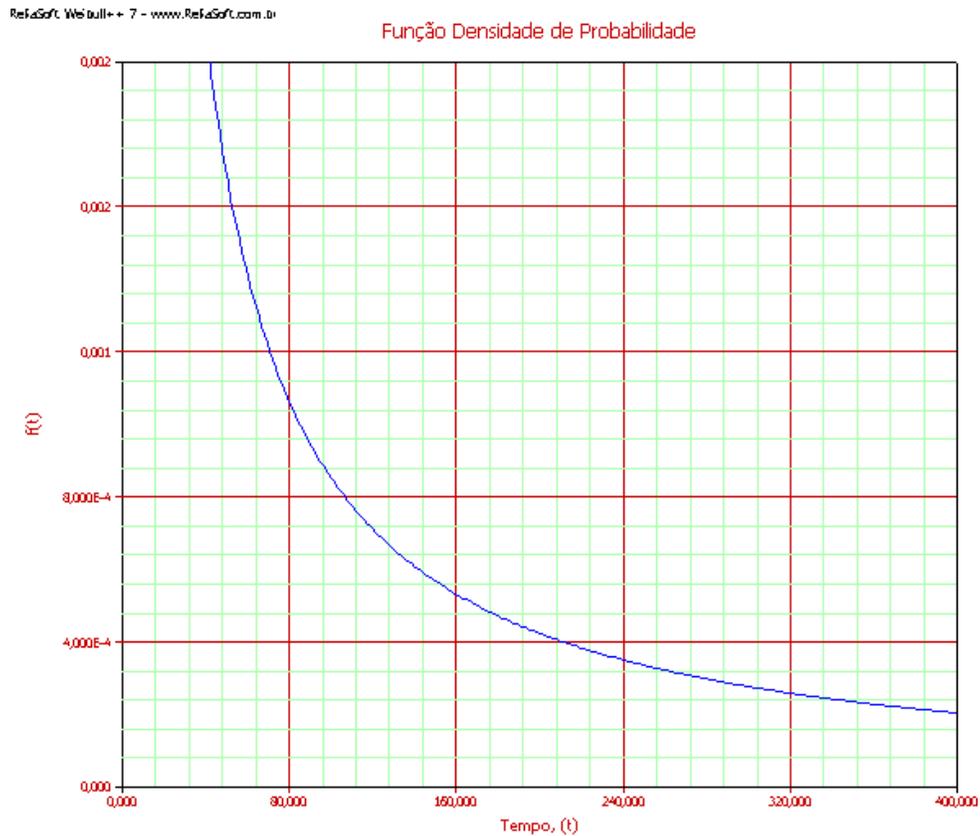


Figura 5 – Função Densidade de Probabilidade do Subsistema Motor diesel

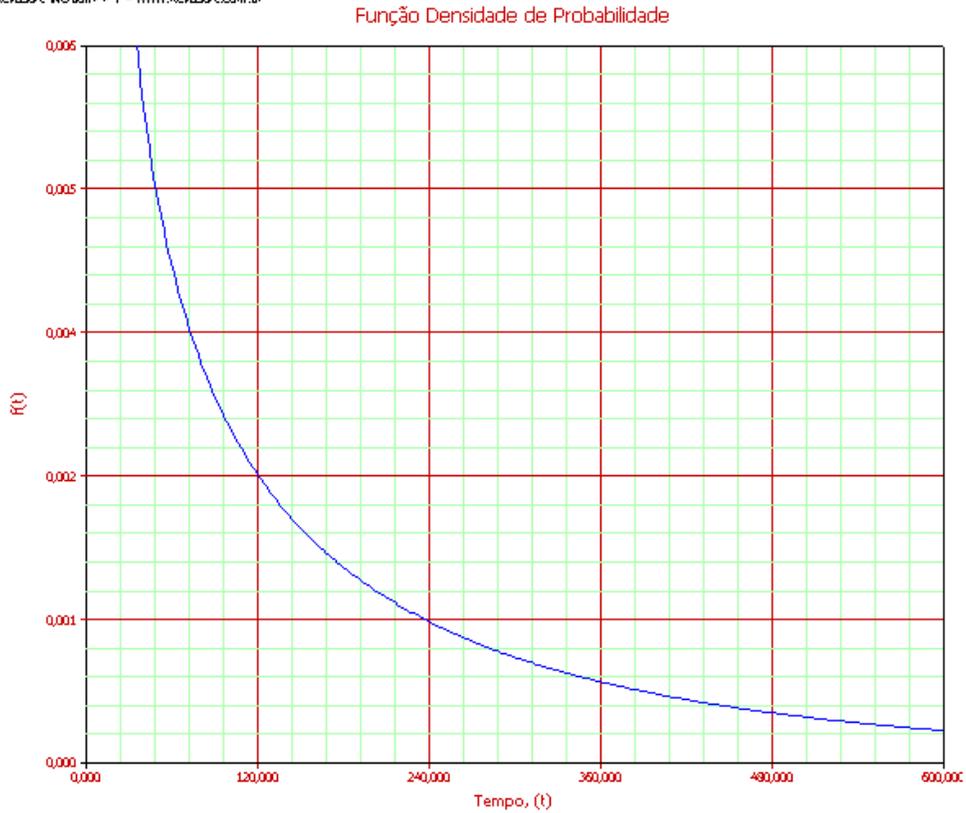


Figura 6 – Função Densidade de Probabilidade do Subsistema Sistema Hidráulico

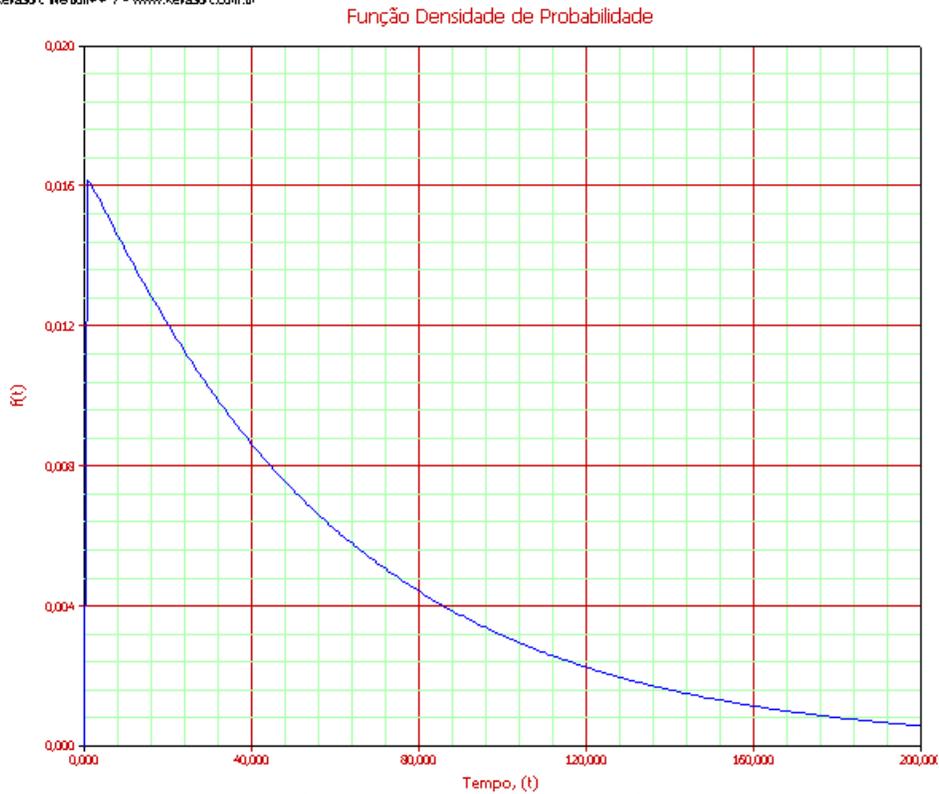


Figura 7 – Função Densidade de Probabilidade do Subsistema Sistema Elétrico

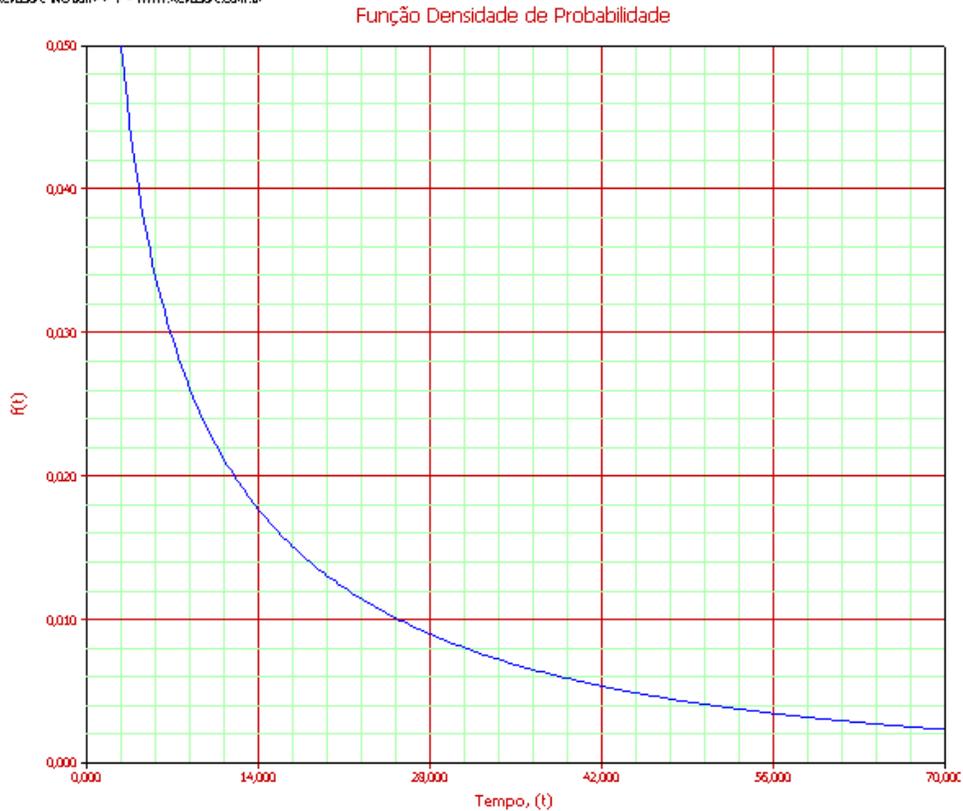


Figura 8 – Função Densidade de Probabilidade do Subsistema Spreader

A Função Confiabilidade Weibull é definida por Reliasoft [8] através da seguinte equação

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2), \text{ onde}$$

β : Parâmetro de forma

γ : Parâmetro de Localização

η : Parâmetro de escala

T : tempo (horas de operação)

$R(T)$: Confiabilidade em T horas

e a Probabilidade de Falha pode ser definida como

$$P(T) = 1 - R(T) \quad (3), \text{ onde}$$

$R(T)$: Confiabilidade em T horas

$P(T)$: Probabilidade de Falha em T horas

A tabela 4 apresenta os resultados da Confiabilidade e Probabilidade de Falha de cada subsistema para um período de 24 horas de operação, de acordo com Reliasoft [6].

Tabela 4 – Confiabilidade e Probabilidade de Falha dos Subsistemas analisados para 24 horas de operação

<i>Subsistemas</i>	<i>Confiabilidade em 24 horas R(24h)</i>	<i>Probab. Falha em 24 horas P(24h)</i>
Pneus e Jantes das Rodas	100% *	0%*
Sistema de Lubrificação Central	100% *	0%*
Fornecimento auxiliar de eletricidade	100% *	0%*
Sistema de Motor Diesel	50,67%	49,33%
Cabos	100% *	0%*
Sistema de Combustível	100% *	0%*
Sistema de Torre/Lança	100% *	0%*
Fins de Curso	100% *	0%*
Sistema Hidráulico	89,20%	10,8%
Chassis/Estabilizadores	100% *	0%*
Sistema elétrico	67,04%	22,96%
Spreader (SP)	34,14%	65,86%

* Alguns dos subsistemas não apresentaram falhas no período analisado, Nestes casos, a confiabilidade destes subsistemas foi considerada, para efeito de cálculo, como 100% para o período de 24 horas de operação do equipamento.

Pode-se notar que o subsistema de maior probabilidade de falha para o período analisado é o Spreader, sendo este componente o principal responsável pela baixa confiabilidade do equipamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Modelagem do Equipamento

Após a determinação das Distribuições de Falhas e Manutenções Corretivas, das Confiabilidades e das Probabilidades de falhas dos subsistemas, é possível realizar a modelagem do sistema, utilizando a técnica de Diagrama de Blocos, onde cada bloco corresponde a um subsistema da Grua, sendo o posicionamento dos mesmos em função da condição de projeto do equipamento.

A figura 9 apresenta o Diagrama de Blocos correspondente a Grua Automóvel, de acordo com a metodologia apresentada por Reliasoft [6].

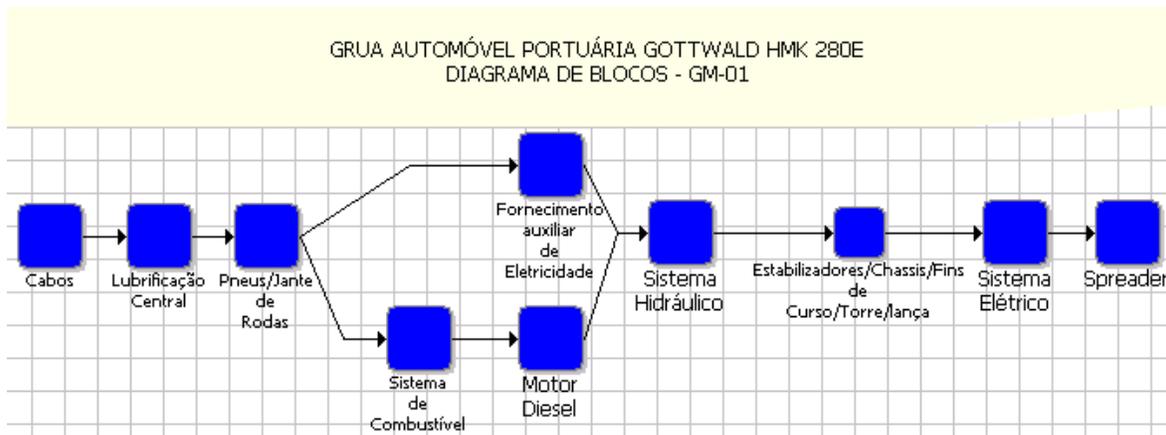


Figura 9 – Diagrama de Blocos da Grua Automóvel Portuária

Através do Diagrama de Blocos do sistema é possível obter as características de comportamento do mesmo. A Tabela 5 mostra os resultados de Confiabilidade e Probabilidade de Falhas do sistema para o período de 24 horas de operação.

Tabela 5 – Confiabilidade e Probabilidade de Falhas do Sistema

Confiabilidade $R(24h)$	Probabilidade de Falhas (24h)
19,60%	80,40%

O comportamento da Confiabilidade e da Probabilidade de Falhas em função do tempo (horas de operação) estão apresentados nas Figuras 10 e 11.

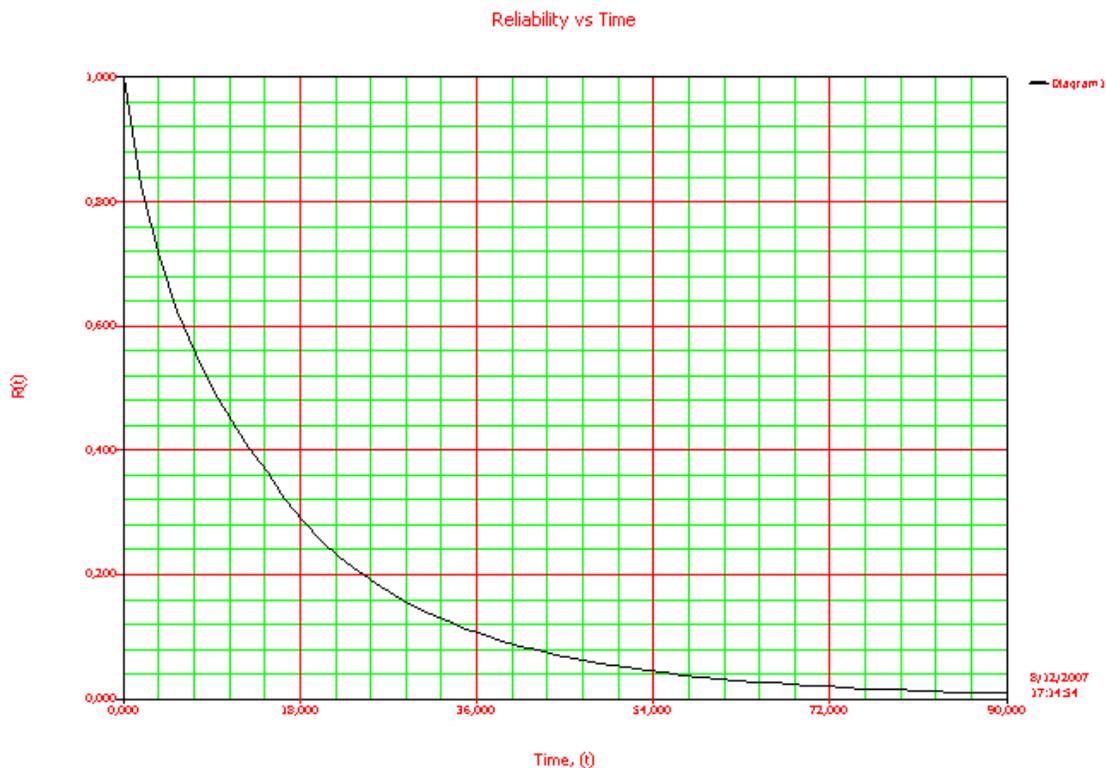


Figura 10 – Função Confiabilidade do Sistema

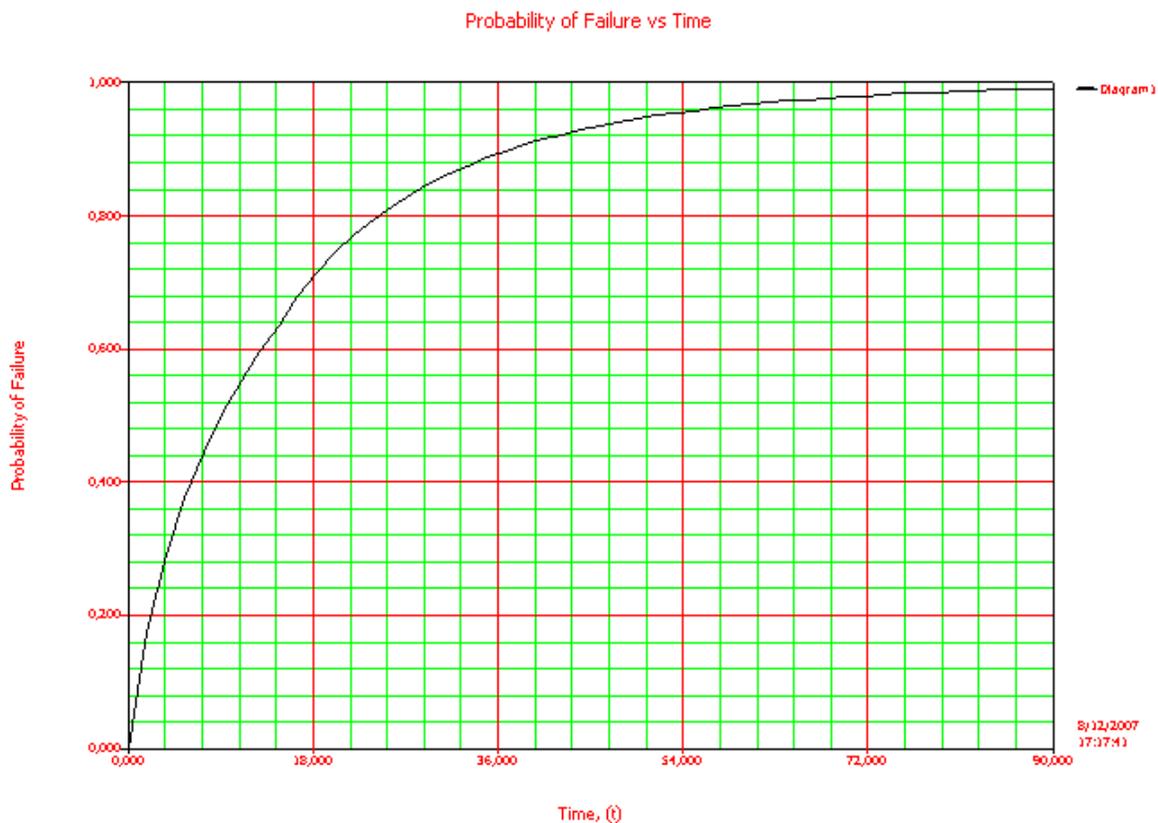


Figura 11 – Função Probabilidade de Falhas do Sistema

Além das informações apresentadas anteriormente, pode-se também realizar a simulação do comportamento de outros indicadores importantes sob o ponto de vista de Manutenção, os quais estão sendo apresentados a seguir.

- ✓ Tempo Médio entre Falhas (MTBF);
- ✓ Disponibilidade Média;
- ✓ Número esperado de falhas;
- ✓ Tempo estimado de Parada do equipamento;
- ✓ Tempo estimado em operação do equipamento.

A tabela 6 apresenta os resultados obtidos para um período de 24 horas de operação do equipamento.

Tabela 6 – Indicadores de Desempenho Estimados através de Simulação para período de 24 horas de operação do equipamento

<i>Indicadores de Desempenho</i>	<i>Resultados Estimados</i>
Disponibilidade Média (%)	97,80
Desvio Padrão da Disponibilidade	2,10
Número esperado de Falhas	1,73
Tempo Médio entre Falhas - MTBF(h)	13,73
Tempo Operante (h)	23,48
Tempo em Manutenção Corretiva (h)	0,52

Extrapolando os resultados obtidos para 24 horas de operação para o período de 1 ano, é possível se obter por simulação os resultados apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Indicadores de Desempenho Estimados através de Simulação para período de 1 ano de operação do equipamento.

<i>Indicadores de Desempenho</i>	<i>Resultados Estimados</i>
Disponibilidade Média (%)	98,33
Desvio Padrão da Disponibilidade	1,20
Número esperado de Falhas	493,40
Tempo Médio entre Falhas - MTBF(h)	15,64
Tempo Operante (h)	8613,64
Tempo em Manutenção Corretiva (h)	146,24
Confiabilidade do Sistema (%)	0
Probabilidade de Falha (%)	100

3.2. Aumento da Confiabilidade

Observa-se através dos resultados apresentados que, para o período de 1 ano de operação, o equipamento ficará inoperante (em manutenção corretiva) por aproximadamente 146,24 horas ou 6,1 dias. Levando em consideração a capacidade de movimentação de containeres deste equipamento é de aproximadamente 12 movimentações por hora, é possível concluir que o equipamento deixaria de executar 1758 movimentações, admitindo que seu grau de utilização fosse de 100 %.

Realizando a mesma análise, porém considerando que a confiabilidade do Spreader para um período de 24 horas fosse de 100%, obtêm-se os resultados apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Indicadores de Desempenho Estimados através de Simulação para período de 24 horas de operação, considerando a Confiabilidade do Subsistema Spreader como 100% para o período.

<i>Indicadores de Desempenho</i>	<i>Resultados Estimados</i>
Disponibilidade Média (%)	99,52
Desvio Padrão da Disponibilidade	0,85
Número esperado de Falhas	0,46
Tempo Médio entre Falhas - MTBF(h)	53,54
Tempo Operante (h)	23,89
Tempo em Manutenção Corretiva (h)	0,11
Confiabilidade do Sistema (%)	59,79
Probabilidade de Falha (%)	40,21

A análise comparativa das duas condições está sendo apresentada através da tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo de Indicadores com alteração da Confiabilidade do Subsistema Spreader em 24 horas de operação

<i>Indicadores de Desempenho</i>	<i>Resultados Estimados com Spreader atual</i>	<i>Resultados Estimados com Spreader ideal</i>
Disponibilidade Média (%)	97,80	99,52
Desvio Padrão da Disponibilidade	2,10	0,85
Número esperado de Falhas	1,73	0,46
Tempo Médio entre Falhas - MTBF(h)	13,73	53,54
Tempo Operante (h)	23,48	23,89
Tempo em Manutenção Corretiva (h)	0,52	0,11
Confiabilidade do Sistema (%)	19,60	59,79
Probabilidade de Falha (%)	80,40	40,21
Movimentações Perdidas (dia)	4,8	1,32

Observa-se através dos resultados apresentados um aumento de aproximadamente 3 vezes da confiabilidade do sistema, acompanhado do acréscimo de aproximadamente 3,5 movimentações diárias, que no período de 1 ano, representaria um acréscimo de 1277 movimentações.

4. CONCLUSÕES

Através das análises e simulações realizadas anteriormente, pode concluir que o aumento da confiabilidade do sistema está intimamente relacionado com o aumento da confiabilidade de seus subsistemas, sendo o subsistema Spreader o de maior impacto na confiabilidade do conjunto.

É possível concluir também, analisando as distribuições de falhas dos subsistemas, que, com exceção do subsistema Sistema Elétrico (com taxa de falhas constante indicando período de vida útil), os subsistemas apresentam coeficientes de forma correspondentes à taxa de falhas decrescentes, o que sugere que estes subsistemas encontram-se ainda na fase de Mortalidade Infantil da “Curva da Banheira”, segundo Lafaia [5], sendo necessária à implantação de melhorias nos equipamentos para que se consiga atingir o período de vida útil. Dentre estas melhorias, pode-se destacar as seguintes:

- ✓ Aplicação de Técnicas de Manutenção Preditiva para Monitoramento de condições do equipamento, tais como inspeção sensitiva, análise de lubrificantes usados, termografia e análise de vibrações;
- ✓ Utilização de Metodologias de Análise e Bloqueio de Falhas, tais como PDCA, 5 Porquês, Diagrama Espinha de Peixe, Árvore de Falhas, FMEA, etc, visando evitar a reincidência das falhas ocorridas;
- ✓ Implantação de melhorias no equipamento oriundas de problemas de projeto do mesmo;
- ✓ Elaboração de Planos de Manutenção e Lubrificação considerando os modos de falhas dos subsistemas, utilizando ferramentas de confiabilidade (Manutenção Centrada em Confiabilidade – RCM e Lubrificação Centrada em Confiabilidade – RCL).

5. REFERÊNCIAS

1. ALADON, LTD. **Maintenance Management**. Lutterworth, 1999.
2. CONSULTANT, I.S.. **An Introduction to Reliability-Centered Spares**. Lechlade, 2001.
3. GOTTWALD DEMAG, **Manual de Manutenção – Grua Automóvel Portuária HMK**

- 280 E**, Dusseldorf, 1997.
4. GOTTWALD DEMAG, **Manual de Operação – Grua Automóvel Portuária HMK 280 E**, Dusseldorf, 1997.
 5. LAFRAIA, J.R.B.. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2001.
 6. RELIASOFT, **BlockSim User's Guide**. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006.
 7. RELIASOFT, **Life Data Analysis Reference**. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006.
 8. RELIASOFT, **System Analysis Reference – Reliability, Availability and Optimization**. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006.
 9. RELIASOFT, **Weibull ++ User's Guide**. Arizona, Reliasoft Publishing, 2006.