



AEAMESP



“21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA”

“PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS”

CATEGORIA 3

**ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE APLICADA COMO FERRAMENTA DE
GESTÃO NA MANUTENÇÃO DO MATERIAL RODANTE DO METRÔ DE SÃO
PAULO – UM ESTUDO DE CASO PRÁTICO**

Elaborado pelo eng. Maique Dias Luz

Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ



AEAMESP



“21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA”

“PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS”

CATEGORIA 3

ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE APLICADA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO NA MANUTENÇÃO DO MATERIAL RODANTE DO METRÔ DE SÃO PAULO – UM ESTUDO DE CASO PRÁTICO

1) INTRODUÇÃO

A Melhoria Contínua nas mais diversas áreas de gestão deve ser uma constante para qualquer empresa gerar lucro e sobreviver frente aos constantes desafios, e a manutenção de seu parque de máquinas e equipamentos é muitas vezes essencial para o alcance deste objetivo.

O Metrô de São Paulo é completamente dependente da adequada manutenção de seus ativos para prestar serviços de qualidade para seus usuários, e juntamente com ela, há a permanente necessidade de buscar disponibilidade operacional adequada, sem extrapolar custos.

A maior importância da operação do Metrô de São Paulo reside na avaliação de seus usuários quanto ao bom serviço prestado pela disponibilização de transporte com qualidade assegurada e nisso o Metrô-SP tem por prática o esforço constante para manter seu consagrado conceito de prestador de serviços de transporte metroviário.



AEAMESP



Este trabalho colabora numa parte importante da missão da empresa, a de otimizar seus processos de manutenção, pautados na Engenharia da Confiabilidade, para reduzir custos com Manutenções Corretivas, e ao mesmo tempo aumentar a percepção positiva de seus usuários pela maior disponibilização de trens em suas linhas.

Com o atual difícil cenário econômico pelo qual o Brasil atravessa, paradoxalmente, é possível extrair resultados benéficos na crise, aproveitando o momento de baixos investimentos para quebrar paradigmas, tomar iniciativas e revisar processos de manutenção, e ferramentas da confiabilidade se mostram importantes aliadas para tornar uma empresa mais produtiva e mais eficiente, utilizando-se de suas tecnologias, mesmo neste complicado cenário.

Assim, foi estudada e apresentada uma proposta prática de utilização da Engenharia da Confiabilidade na manutenção, inicialmente para um sistema de uma das frotas do Metrô-SP, com objetivos de reduzir o número de Manutenções Corretivas e seus custos com peças e mão-de-obra, colaborando assim no objetivo principal.

2) DIAGNÓSTICO

A gestão otimizada de processos no mundo vem sendo já há algum tempo muito dependente de novos conceitos, tecnologias e de recursos de softwares existentes, e na manutenção dos trens do Metrô-SP com sua operação ao longo de seus mais de 40 anos de existência, ela deve acompanhar esta evolução.

O Metrô-SP vem constantemente buscando otimizar a sua manutenção e identificou que uma das frentes da Engenharia da Confiabilidade, voltada para as Manutenções Corretivas,



AEAMESP



pode ser de grande importância para os processos de manutenção, que funcionaram muito bem no passado, mas que hoje requerem novos modelos para fazer frente aos novos desafios.

A quantificação da confiabilidade de seus diversos subsistemas foi considerada essencial para produzir mais com menos, que no caso do Metrô-SP se traduz em economia com peças e mão-de-obra sem dispender com grandes investimentos.

O diagnóstico de sua atual situação demonstra que, mesmo diante de banco de dados sem apontamentos detalhados e mão-de-obra comprometida para manter o parque de trens existente, ainda é possível executar ações que trazem efeitos benéficos para a gestão da manutenção, sem causar prejuízo às atividades já em andamento.

Havendo a necessidade de buscar novas formas de melhorar a manutenção, a pergunta que se fez inicialmente foi até quanto em profundidade se investiria na engenharia da confiabilidade, e mais importante do que isso, em saber se resultados interessantes já seriam possíveis empregando os recursos em parte de seus sistemas ou se um bom resultado seria possível somente se a ferramenta fosse empregada apenas num trem completo, o que demandaria significativa mão-de-obra de engenharia, indisponível no momento e inviabilizando o projeto.

Registra-se que não é a primeira vez que se ouve falar em Engenharia da Confiabilidade no Metrô-SP e que a última investida feita, em meados de 2.009, buscou abranger um volume muito grande e simultâneo de projetos, e talvez por isso não tenha apresentado os resultados esperados.

Diante disso, outra pergunta que se fez foi se a Engenharia da Confiabilidade ainda valeria a pena, pois todos os projetos precisaram ser paralisados depois de algum tempo naquela ocasião.



AEAMESP



Insistindo na importância deste campo, aproveitou-se de um projeto elaborado na gestão do ativo Sistema de Portas de uma frota de trens, que na ocasião, avançou a ponto de ser possível fazer mais alguns ajustes para permitir testar as ferramentas de confiabilidade que já estavam disponíveis na Companhia.

Felizmente o projeto deste trabalho foi voltado para um dos sistemas que mais apresentam falhas e, conseqüentemente, dos que mais causam interferências na operação comercial e na percepção do usuário, o que permitiu mostrar com importância ainda maior que a Engenharia da Confiabilidade é, sim, uma importante aliada para a manutenção mais otimizada dos trens.

2.1) Desenvolvimento do Trabalho

O desenvolvimento do trabalho em suas diversas etapas está descrito na sequência, por ordem cronológica.

2.1.1) Elaboração do Contexto Operacional e FTA (*Fault Tree Analysis*) – Árvores de Falha do Sistema de Portas

O Contexto Operacional descreve o papel desempenhado do ativo, sua relevância, o arranjo físico, regimes de trabalho, níveis de solicitação, condições e meio ambiente a que o ativo está submetido. Ele é a base para subsidiar a elaboração de todas as demais etapas.

Já a Árvore de Falha, conhecido também como FTA – *Fault Tree Analysis*, consiste em um processo lógico e dedutivo que, partindo-se de um evento indesejado e pré-definido (evento topo), busca-se as possíveis causas de tal evento (pensamento reverso).



AEAMESP



A elaboração da Árvore de Falha trás uma série de outros benefícios, tais como o aumento do domínio das características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema, a identificação da sequência das falhas críticas e a melhor interação entre os integrantes das equipes de projeto, operação e manutenção.

É fato que quanto mais se conhece do sistema (suas funções, modos de falha e causa), mais fácil será a elaboração das diversas Árvores de Falha, de modo que a Engenharia da Confiabilidade por si só não extrai resultados sem o envolvimento técnico e da experiência do conhecedor do sistema, neste caso, primariamente a Engenharia de Manutenção.

2.1.2) Edição das FTA's e Geração dos Diagrama de Blocos de Confiabilidade – Dentro do Software Blocksim®

Todas as Árvores de Falhas geradas para compor o sistema de portas de uma frota do Metrô-SP necessitaram ser construídas dentro do software Blocksim®, pois o software originalmente utilizado para o trabalho naquela ocasião ainda não contemplava recursos quantitativos de confiabilidade.

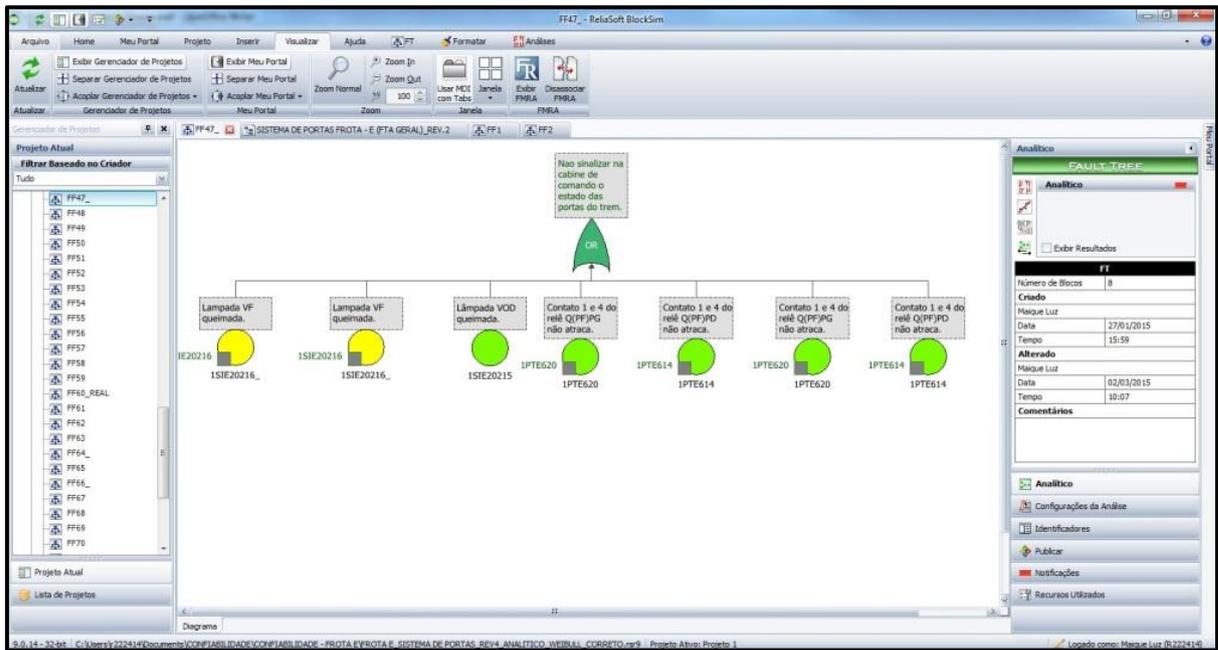


Fig. 2 – Tela do Blocksim® ilustrando uma das diversas Árvore de Falha que compõem o Sistema de Portas

Um Diagrama de Blocos de Confiabilidade, também conhecido como RBD - *Reliability Block Diagram* – é uma representação gráfica dos componentes/subsistemas de um sistema e como eles estão logicamente conectados. Ele pode ser entendido como um Diagrama Lógico de Confiabilidade e é composto por blocos que representam os componentes de um sistema e linhas conectadas aos blocos, cujas disposições (direções) definem a configuração de confiabilidade do sistema. Um bloco pode representar um componente ou uma montagem (um subsistema ou sistema).

No mínimo um bloco de confiabilidade deve incluir informações de como o item falha, i.e., o Modelo de Confiabilidade de um bloco.

Uma vez criado o ‘RBD’ do sistema, este pode ser analisado para determinar a sua confiabilidade.

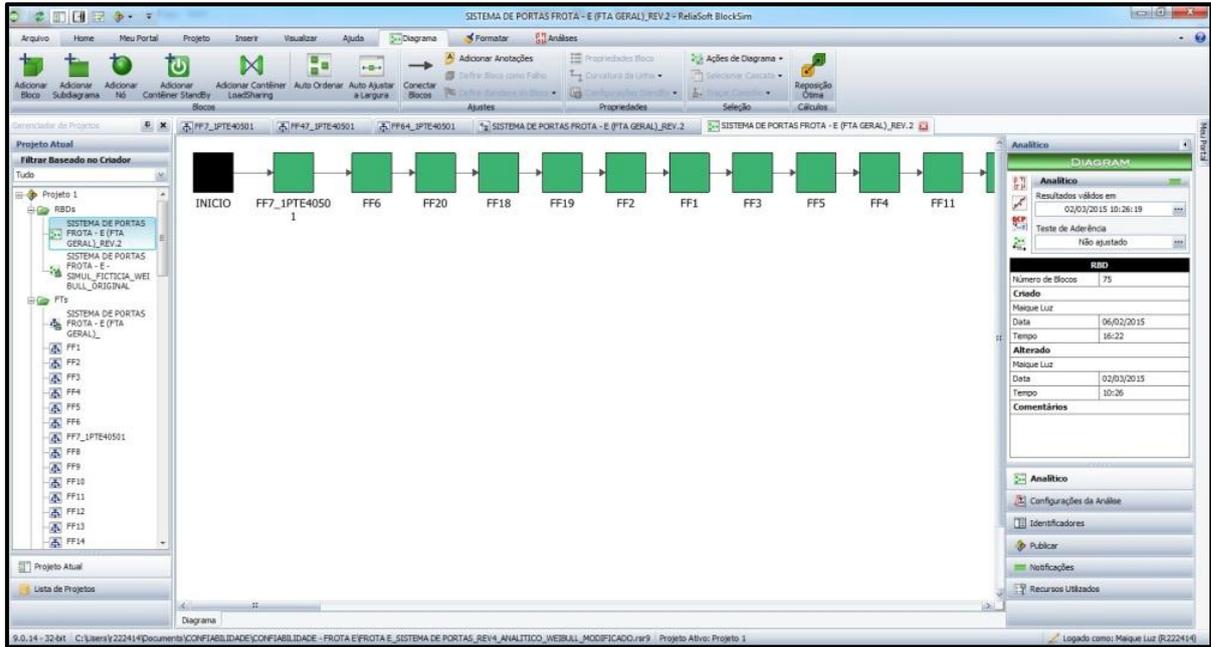


Fig. 3 – Tela do Blocksim® ilustrando parte do Diagrama de Blocos de Confiabilidade do Sistema de Portas montado em série

No caso do Sistema de Portas, todos os blocos foram conectados em série, de modo que todos devem estar funcionando para que o Sistema também esteja. Se qualquer um dos itens em série falhar, então o sistema também falha, como ocorre no rompimento de um elo de uma corrente.

2.1.3) Levantamento de Todos os Apontamentos da Manutenção Corretiva no Sistema “Consulta de Material Rodante (PostgreSQL)”

Esta etapa consistiu em levantar todos os apontamentos das ocorrências de manutenção corretiva relacionados ao sistema de frota da Frota ‘E’ compreendidos no período de 01/01/2012 a 31/12/2014.

Aqui envolve apenas a extração dos diversos apontamentos no banco de dados da manutenção, cujo nome do sistema disponível na companhia é “Consulta de Material Rodante (PostgreSQL)”. A contabilização de quilometragem acumulada para cada causa e demais processamentos ainda virão em etapas posteriores.

	Pedido	Nat.	Lin.	OS	Data	Equipe	Trem	km	Carro	Finalidade	Defeito	Reparo	Eqpto Rep.
▶	DG1549	OC	2	1	22/01/2015	MC2	201	1.871.361	2011	1ACE106	14C	51W	
	DG1546	OC	2	1	22/01/2015	MC2	201	1.871.361	2013	1PSE50802	024	533	
	DG0155	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2016	1VTE	232	52P	
	DG0161	OC	2	2	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2014	1PSE70103	14K	533	
	DG0162	OC	2	2	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2016	1SIE20301	088	506	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2011	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2011	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2011	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2011	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2012	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2013	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2013	1SIE10113	024	533	
	DF9382	OC	2	1	21/01/2015	MC2	201	1.871.105	2014	1SIE10113	024	533	

Fig. 4 – Tela de “Consulta de Material Rodante (PostgreSQL)” de onde é possível extrair todos os apontamentos da manutenção corretiva

2.1.4) Classificação e Filtragem de Planilha Montada no Excel® e Levantamento das Diversas Quilometragens até as Falhas no Sistema “Km – Trem”

Uma vez levantados os apontamentos do período, houve a necessidade de preparar todos os dados para atender as etapas subsequentes que envolvem cálculos estatísticos.

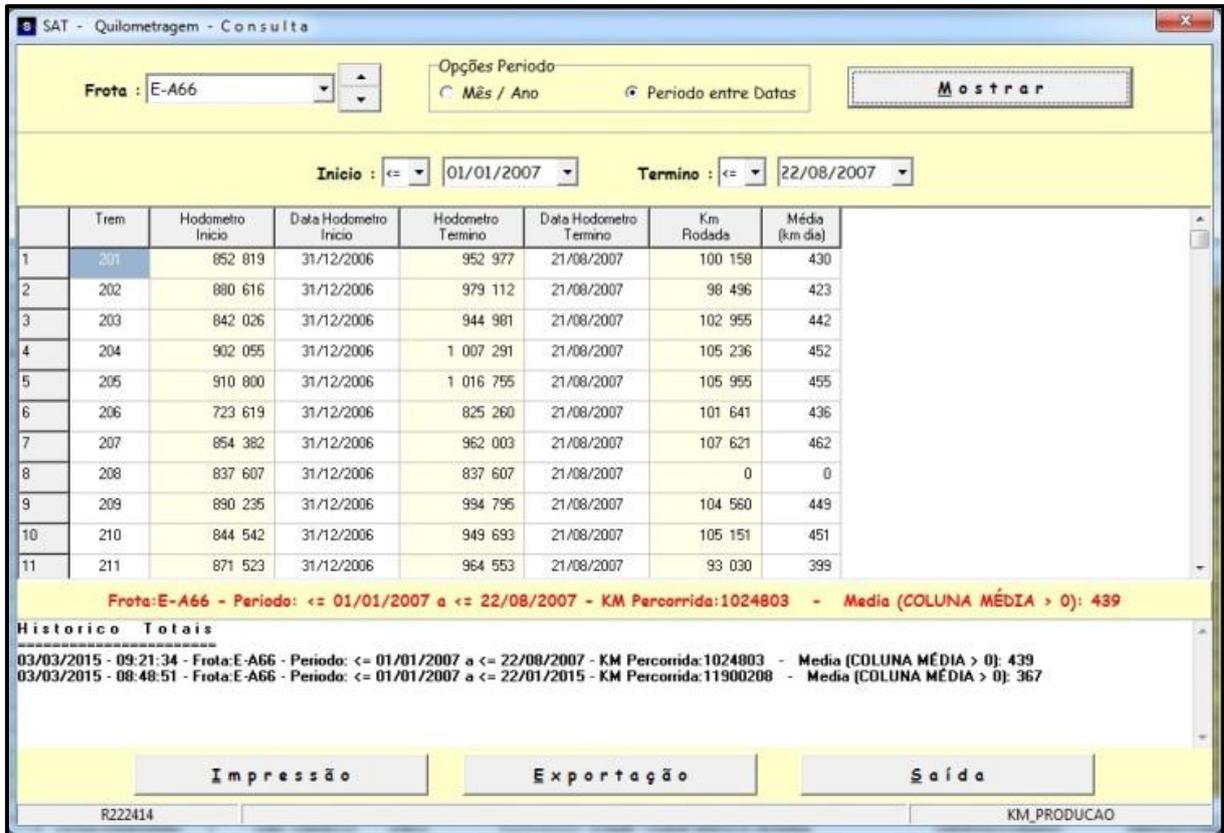
Esta tarefa consiste em migrar os apontamentos (Fig. 4) para um software de planilha qualquer (neste trabalho foi utilizado o Excel®), para possibilitar ordenar os diversos dados tais como o código do item/conjunto trabalhado, o tipo de reparo efetuado, a data da ocorrência da falha e outros.

Item	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
KM FROTA	DATA	EQUIPE	TREM	KM	CARRO	FINALIDADE	FINALIDADE	DEFETO	REPARO	COD. SINT	DESCRIÇÃO DO SINTOMA			
5373456	04/04/2010	MRNC	202	1402823	2022	1PTE606	RELE Q(OV)JD - ABERTURA PORTAS DIR	DESENCALXADO	REESTABELECIDO	T82	CARRO NAO ABRE PORTAS			
205919	07/06/2010	MRNC	210	1381959	2101	1PTE609	RELE Q(OV)JD - ABERTURA PORTAS DIR	NAO OPERA	SUBSTITUÍDO	T82	CARRO NAO ABRE PORTAS			
1142173	05/06/2011	MRNC	210	1487391	2103	1PTE609	RELE Q(OV)JD - ABERTURA PORTAS DIR	NAO OPERA	SUBSTITUÍDO	J38	PORTA NAO ABRE			
91529	01/01/2011	MRNC	202	1514292	2024	1PTE609	RELE Q(OV)JD - ABERTURA PORTAS DIR	RELE DEFEITUOSO	SUBSTITUÍDO	T62	CARRO NAO ABRE PORTAS			
2656922	25/05/2013	MC2	202	1737251	2026	1PTE609	RELE Q(OV)JD - ABERTURA PORTAS DIR	SUSPEITA DE FALHA	SUBSTITUÍDO	T62	CARRO NAO ABRE PORTAS			
2395	09/06/2013	MC2	201	1676030	2014	1PTE610	RELE Q(OV)JD - ABERTURA PORTAS DIR ATC	SUSPEITA DE FALHA	SUBSTITUÍDO	J38	PORTA NAO ABRE			
2396	21/01/2014	MC2	206	1740345	2066	1PTE613	RELE Q(F)PD - FECHAMENTO PORTAS DIR	DANIFICADO	SUBSTITUÍDO	T52	TREM NAO TEMPORIZA FECHAMENTO			
2397	06/01/2015	MC2	206	1802027	2066	1PTE613	RELE Q(F)PD - FECHAMENTO PORTAS DIR	MAU CONTATO	SUBSTITUÍDO	T64	CARRO NAO FECHA PORTAS			
2398	14/06/2010	MRNC	210	1383550	2102	1PTE615	RELE Q(OV)PD - ABERTURA PORTAS ESQ	MAU CONTATO	SUBSTITUÍDO	T61	NAO ABRE PORTAS EM ATO			
2399	25/05/2013	MC2	202	1737251	2026	1PTE615	RELE Q(OV)PD - ABERTURA PORTAS ESQ	SUSPEITA DE FALHA	SUBSTITUÍDO	T62	CARRO NAO ABRE PORTAS			
3400	15/02/2013	MC2	211	1667474	2111	1PTE617	RELE QXFG - MANUTENCAO FECHAM ESQ	RELE DEFEITUOSO	SUBSTITUÍDO	T64	CARRO NAO FECHA PORTAS			
3401	15/02/2013	MC2	211	1667474	2111	1PTE618	RELE QXFG - AUTORIZACAO FECHAM ESQ	RELE DEFEITUOSO	SUBSTITUÍDO	T64	CARRO NAO FECHA PORTAS			
3402	04/10/2010	MRNC	205	1480187	2051	1PTE623	CONJUNTO PORTA FECHADA CONTR GERAL	DESREGULADO	AJUSTADO	T96	FECHADURA PORTA CABINE/SALAO C/			
3403	09/04/2012	MRNC	214	1548997	2114	1PTE623	CONJUNTO 28(P)JT - COMUT COMANDO	DANIFICADO	SUBSTITUÍDO	T90	DERIVACAO DE PORTAS INOP			
3404	19/08/2007	MRNC	209	993901	2091	1PTE624	PLACA DE DIODOS	DIODO DEFEITUOSO	SUBSTITUÍDO	T62	PAINEL LOCAL DE PORTAS INOP			
3405	18/04/2013	MC2	208	1560851	2082	1PTE625	DIODO DA PLACA DE DIODOS	CURTO CIRCUITADO	SUBSTITUÍDO	TM5	PORTAS FECHADAS SINALIZA ABERTA I			
3406	20/08/2010	MRNC	202	1433598	2021	1PTE627	CONECTOR DIREITO - PNL GERAL PORTAS	SOLTO	RECOLOCADO	T32	ALARME DE PORTAS C/ RUÍDO ANORM			
3407	28/08/2012	MC2	210	1581317	2106	1PTE627	CONECTOR DIREITO - PNL GERAL PORTAS	FIACAO PARTIDA	REPARADO	T54	TREM SEM SINALIZACAO DE PORTAS FE			
3408	28/12/2012	MC2	202	1685615	2026	1PTE627	CONECTOR DIREITO - PNL GERAL PORTAS	SOLTO	APERTADO	T39	APLICA FECHO DE EMERG INDEVIDAME			
3409	01/12/2014	MC2	210	1937780	2106	1PTE627	CONECTOR DIREITO - PNL GERAL PORTAS	PINO C/MAU CONTATO	REPUXADO	T33	ALARME DE PORTAS INOP			
3410	13/08/2011	MRNC	207	1539142	2076	1PTE628	CONECTOR ESQUERDO	MAU CONTATO	ELIMINADO	T33	ALARME DE PORTAS INOP			
3411	04/01/2013	MC2	205	1764985	2051	1PTE628	CONECTOR ESQUERDO	PINO C/MAU CONTATO	REPARADO	T53	TREM PERDE SINALIZACAO DE PORTAS			
3412	14/02/2013	MC2	209	1763109	2096	1PTE628	CONECTOR ESQUERDO	SOLTO	SOLDADO	T53	TREM PERDE SINALIZACAO DE PORTAS			
3413	22/05/2013	MC2	208	1573904	2081	1PTE628	CONECTOR ESQUERDO	PINO DEFEITUOSO	SUBSTITUÍDO	T54	TREM SEM SINALIZACAO DE PORTAS FE			
3414	3839381	3839381	28/03/2009	MRNC	210	1214994	2101	1PTE690	FIACAO - PNL GERAL PORTAS	REPARADO	T62	CARRO NAO ABRE PORTAS		
3415	289972	8129215	30/03/2010	MRNC	202	1401392	2021	1PTE690	FIACAO - PNL GERAL PORTAS	MAU CONTATO	ELIMINADO	T33	ALARME DE PORTAS INOP	
3416	727099	885642	07/03/2014	MC2	208	1679940	2083	1PTE690	FIACAO - PNL GERAL PORTAS	SOLTO	REPARADO	J38	PORTA NAO ABRE	
3417	2678663	2678663	03/08/2008	MRNC	209	1361198	2093	1PTE7	PAINEL COMANDO LOCAL PORTAS	SUSPEITA DE FALHA	SUBSTITUÍDO	T16	BOTAO SOCO DANIFICADO/INOP	
3418	2343136	5021708	26/12/2009	MRNC	210	1320074	2102	1PTE7	PAINEL COMANDO LOCAL PORTAS	CORPO ESTRANHO	REESTABELECIDO	T11	PORTA ABRE INDEVIDAMENTE PELO B	
3419	421924	5483717	26/04/2010	MRNC	210	1365855	2104	1PTE7	PAINEL COMANDO LOCAL PORTAS	FIO SOLTO	REPARADO	T62	CARRO NAO ABRE PORTAS	
3420	1293459	8737176	09/06/2011	MRNC	205	1562578	2051	1PTE7	PAINEL COMANDO LOCAL PORTAS	DESREGULADO	REGULADO	T80	DERIVACAO DE PORTAS INOP	

Fig. 5 – Ordenação dos diversos apontamentos dentro do Excel® para subsidiar próximas etapas

Na sequência, para cada apontamento de cada código de item/conjunto e cada data de ocorrência, foi extraído a quilometragem percorrida da frota, iniciando pela data

estabelecida de 01/01/2012. Os diversos valores de quilometragem acumulada servirão para fazer a Análise de Dados de Vida de cada item que compõe o Sistema de Portas.



SAT - Quilometragem - Consulta

Frota : E-A66

Opções Período
 Mês / Ano Período entre Datas

Início : 01/01/2007 Término : 22/08/2007

	Trem	Hodometro Início	Data Hodometro Início	Hodometro Término	Data Hodometro Término	Km Rodada	Média (km dia)
1	201	852 819	31/12/2006	952 977	21/08/2007	100 158	430
2	202	880 616	31/12/2006	979 112	21/08/2007	98 496	423
3	203	842 026	31/12/2006	944 981	21/08/2007	102 955	442
4	204	902 055	31/12/2006	1 007 291	21/08/2007	105 236	452
5	205	910 800	31/12/2006	1 016 755	21/08/2007	105 955	455
6	206	723 619	31/12/2006	825 260	21/08/2007	101 641	436
7	207	854 382	31/12/2006	962 003	21/08/2007	107 621	462
8	208	837 607	31/12/2006	837 607	21/08/2007	0	0
9	209	890 235	31/12/2006	994 795	21/08/2007	104 560	449
10	210	844 542	31/12/2006	949 693	21/08/2007	105 151	451
11	211	871 523	31/12/2006	964 553	21/08/2007	93 030	399

Frota: E-A66 - Período: <= 01/01/2007 a <= 22/08/2007 - KM Percorrida: 102480.3 - Média (COLUNA MÉDIA > 0): 439

Historico Totais

03/03/2015 - 09:21:34 - Frota: E-A66 - Período: <= 01/01/2007 a <= 22/08/2007 - KM Percorrida: 102480.3 - Média (COLUNA MÉDIA > 0): 439
03/03/2015 - 08:48:51 - Frota: E-A66 - Período: <= 01/01/2007 a <= 22/01/2015 - KM Percorrida: 11900208 - Média (COLUNA MÉDIA > 0): 367

Impressão Exportação Saída

R222414 KM_PRODUCAO

Fig. 6 – Tela do Sistema de Consulta de Quilometragem das frotas do Metrô-SP

Ressalta-se que a quilometragem levantada é da frota de trens, no caso da Frota ‘E’ composta por 11 trens, pois o interesse do trabalho está voltado em conhecer a confiabilidade e os custos para a frota, embora também seja possível fazer a mesma avaliação para cada um dos trens.

2.1.5) Modelagem LDA (*Life Data Analysis*) – Análise de Dados de Vida - de Cada Causa no Weibull++®

A Análise de Dados de Vida utiliza teorias estatísticas para construir modelos probabilísticos, a partir de dados de falha. Os modelos são utilizados para realizar previsões precisas.

Na Análise de Dados de Vida e na Engenharia da Confiabilidade, tudo é baseado em estimativas, i.e., o valor real da confiabilidade de um item nunca será conhecido, a menos que todos os itens falhem. Assim, o objetivo da Engenharia da Confiabilidade é a de prever com a maior precisão possível o valor real.

A Engenharia da Confiabilidade está diretamente relacionada com a probabilidade de um item desempenhar uma dada função, sem falhar, por um determinado intervalo de tempo e dentro de certas condições de uso.

Para isso, são requeridos modelos que forneçam a estimativa de taxa de falha do produto em função do tempo, para estimar a probabilidade de falha de um item para uma dada idade, ou para um dado intervalo de tempo.

Os modelos (ou distribuições) são equações ou funções matemáticas contínuas pelas quais se podem realizar interpolações e extrapolações e assim representar o comportamento de uma população (descrever um comportamento da taxa de falha). Estes modelos probabilísticos são baseados em distribuições estatísticas, as quais definem distribuições de vida.

Por definição, Taxa de Falha é a chance do item/conjunto falhar na próxima e menor unidade de tempo, dado que o item funcionou até então. Esta taxa pode ter, ao longo do tempo, formas crescentes, decrescentes, constantes, em forma de “banheira” ou nenhum destes citados. A Taxa de Falha crescente indica desgaste ou velhice do item, a Taxa de Falha

decrecente indica um comportamento de mortalidade infantil e uma curva na forma de “banheira” indica mortalidade infantil seguida de desgaste.

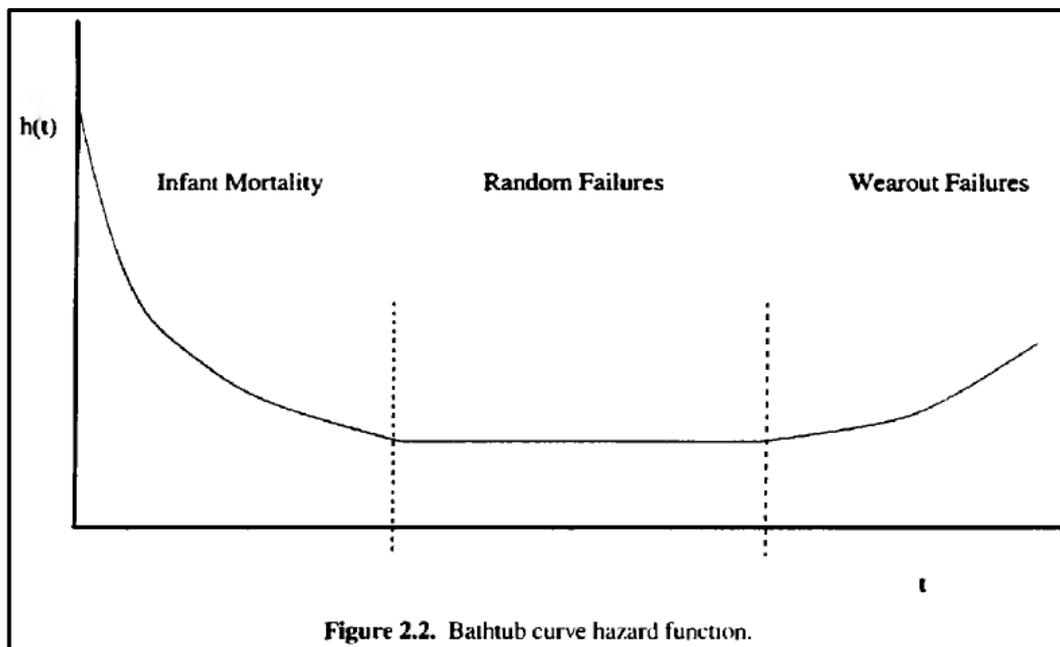


Fig. 7 – Curva da Banheira mostrando a mortalidade infantil, falhas aleatórias e falhas por desgaste (Ref. *Statistical Methods for Reliability Data*, William Q. Meeker & Luis A. Escobar)

Existem diferentes distribuições, tais como a Weibull, Exponencial, Normal e a Log-normal, estas as mais conhecidas empregadas nas Análises de Dados de Vida deste estudo, e que foram formuladas por estatísticos, matemáticos e engenheiros para modelar matematicamente o comportamento populacional.

A seguir é apresentado um breve resumo teórico de cada distribuição utilizada, cujo aprofundamento é dispensado deste artigo por não fazer parte do escopo.

2.1.5.1) Distribuição Weibull

Esta distribuição é uma proposta geral para a análise de confiabilidade, sendo muito flexível e, por esta razão, amplamente utilizada.

O comportamento da Taxa de Falha na Weibull pode ser crescente, decrescente ou constante. A forma mais popular (e mais simples) da distribuição Weibull é a com dois parâmetros, ou seja, bi paramétrica.

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

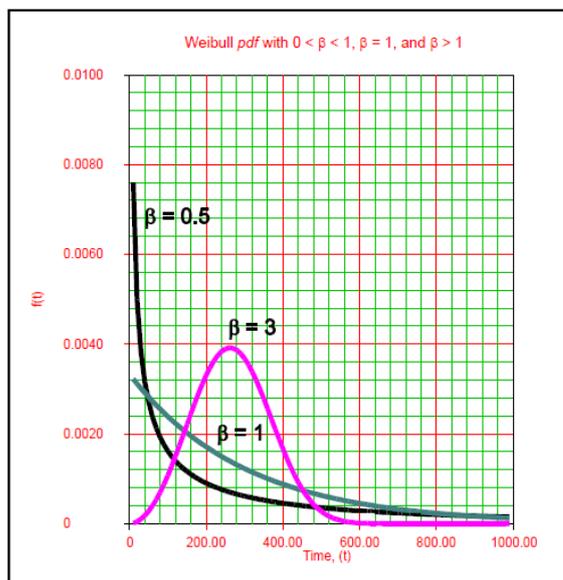


Fig. 8 – Exemplo de distribuição Weibull e sua Função Densidade Probabilidade (Ref. *Presentation Handouts – Reliability Seminar – CRP Intensive – Reliasoft* para esta figura e para as próximas três)

2.1.5.2) Distribuição Exponencial

É uma das distribuições mais simples e frequentemente utilizada indevidamente, pois seu uso é indicado somente para quando a Taxa de Falha é constante. A Função Densidade Probabilidade deste comportamento e sua representação gráfica estão apresentadas na Fig. 9.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

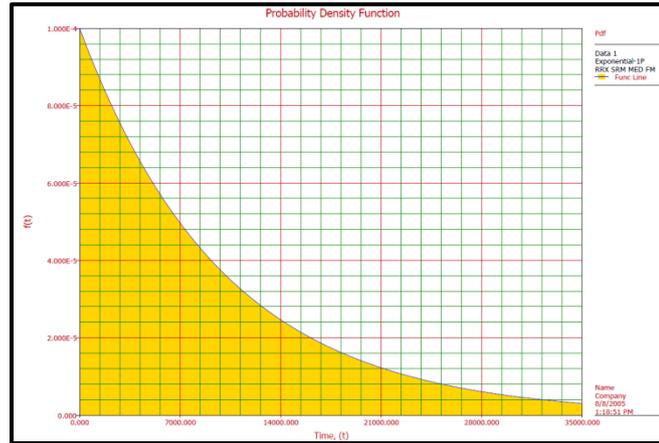


Fig. 9 – Exemplo de Distribuição Exponencial e sua Função Densidade Probabilidade

Notar que a Distribuição Exponencial é amodal, i.e., não apresentam uma tendência, e por este motivo, é indicada somente para quando as falhas são aleatórias.

2.1.5.3) Distribuição Normal

A Distribuição Normal (Gaussiana) é uma das distribuições mais conhecidas, com seus dois parâmetros de média e desvio padrão, com o segundo deles sendo um parâmetro de forma sobre o gráfico da Função Densidade Probabilidade. Assim, a variabilidade será maior à medida que o valor de σ (desvio padrão) cresce e vice versa.

A taxa de falha da normal tem comportamento crescente.

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

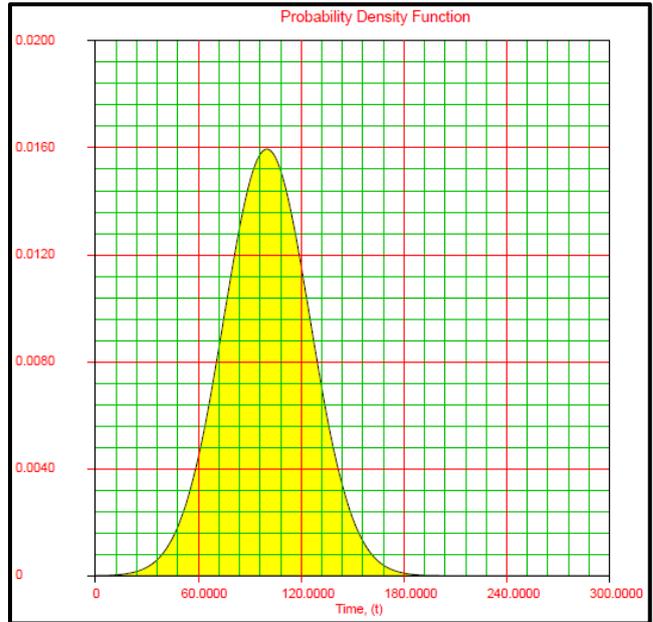


Fig. 10 – Exemplo de Distribuição Normal e sua Função Densidade Probabilidade

2.1.5.4) Distribuição Log-Normal

A distribuição Log-Normal é comumente utilizada na análise de confiabilidade, em ciclos até falha, para fadiga, resistência de materiais e nos projetos probabilísticos com cargas variáveis.

Enquanto a Distribuição Normal é simétrica com relação ao tempo, a Distribuição Log-Normal é assimétrica e deslocada para a esquerda, permitindo um ajuste melhor em comportamentos assimétricos de dados de vida.

A função completa da taxa de falha da distribuição Log-Normal é inicialmente crescente e então decrescente, sempre.

Curioso observar que se a Análise de Dados de Vida resultar numa Log-Normal, isso indica que podemos estar tendo falha prematura do item.

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

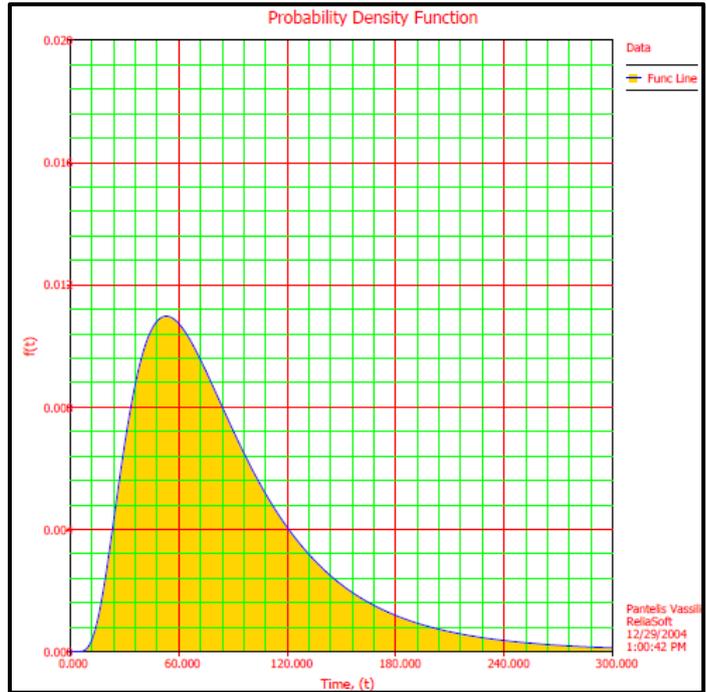


Fig. 11 – Exemplo de Distribuição Log-Normal e sua Função Densidade Probabilidade

A modelagem dos dados de vida das peças/conjuntos que constituem o Sistema de Portas, após a organização dos apontamentos feito em planilha, foi feita no software Weibull++®.

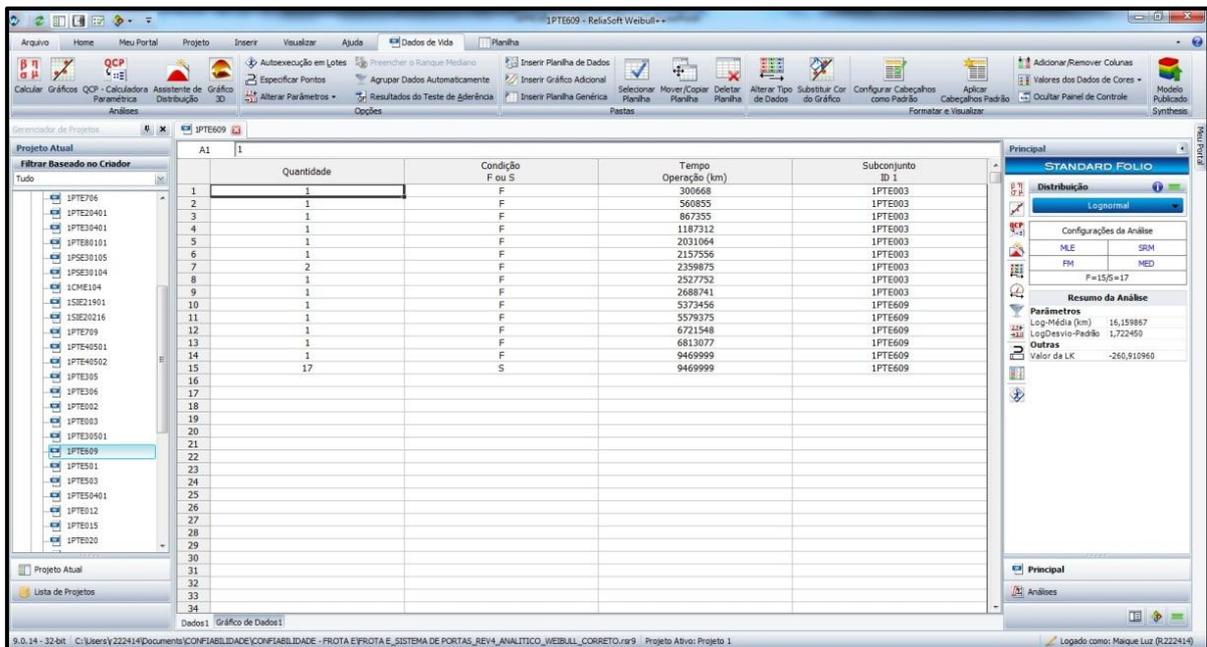


Fig. 12 – Tela do software Weibull++® ilustrando entrada dos dados de quilometragem até a falha para um dos diversos itens do sistema

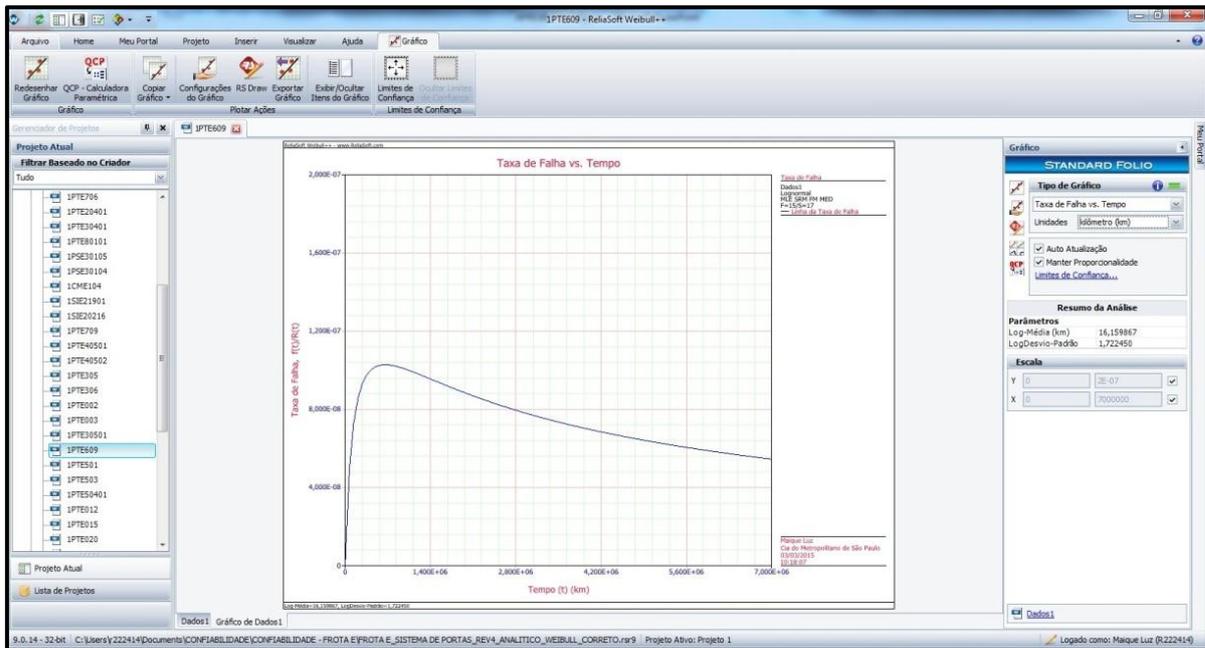


Fig. 13 – Tela do software Weibull++® ilustrando o gráfico resultante do comportamento da Taxa de Falha em Log-Normal para um dos itens

2.1.6) Transferência dos Resultados das Análise de Dados de Vida para os blocos das Árvores de Falha dentro do Blocksim®

Uma vez completada as Análises de Dados de Vida para todos os itens/conjuntos que constituem o Sistema de Portas, todos os seus resultados (distribuições de falha) são então transferidos para dentro do Diagrama de Blocos de Confiabilidade conforme já concluído no item 2.1.2.

Como a configuração do diagrama do sistema de portas foi montada todo em série, como já citado, todos os blocos necessitam ter sucesso para que a missão principal tenha sucesso. Assim, a confiabilidade do sistema é a probabilidade de que o bloco 1 tenha sucesso, que o bloco 2 tenha sucesso e que todos os 'n' blocos em série no sistema tenham sucesso, para uma dada quilometragem.

Neste caso, a confiabilidade do sistema será dada por:

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

Curioso comprovar que a Confiabilidade do Sistema sempre será igual ou menor do que o menor valor de confiabilidade de um dado bloco.

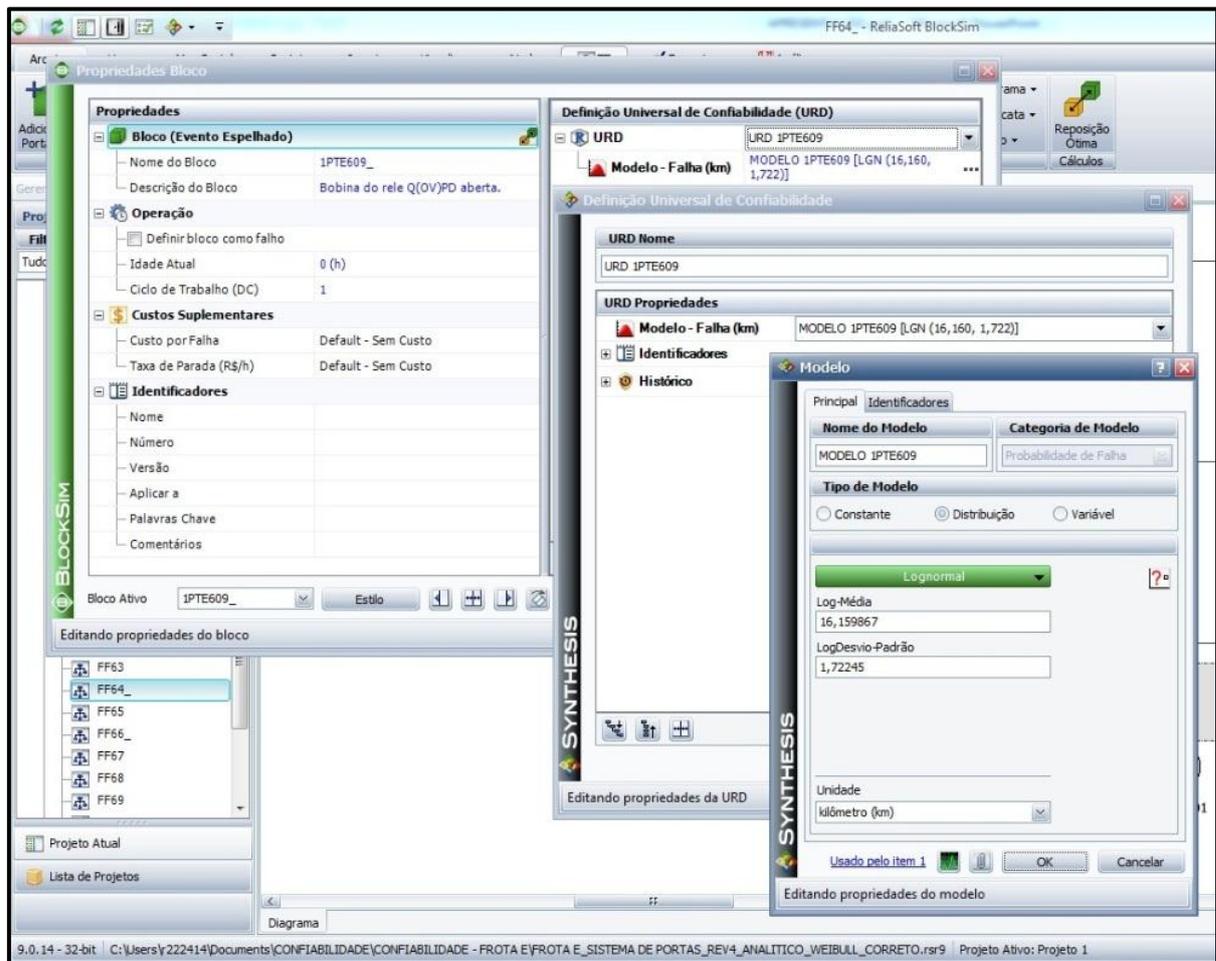


Fig. 14 – Tela do Blocksím® ilustrando onde é definido o comportamento de falha para um dado item/conjunto já calculado no Weibull++®

2.1.7) Diagrama Analítico – Cálculo da Confiabilidade Para Um Ano de Operação Considerando a Manutenção Atual e Definição dos “*Bad Actors*”

Após a realização do cálculo de confiabilidade para uma dada quilometragem de frota, é possível obter a Confiabilidade Geral do Sistema.

Explorando cada uma das diversas árvores de falha após os cálculos do software, é possível também verificar os valores de confiabilidade para cada item que compõe o sistema.

Porém, para facilitar a visualização do todo para permitir analisar e melhorar a disponibilidade do sistema, há um recurso de relatório dentro do software Blocksim® denominado ‘Relatório FRED’, que nada mais é do que um recurso gráfico para visualização dos diversos blocos (e/ou árvores de falhas) mais críticas em termos de confiabilidade, e mais além, permite visualizar qual o item/conjunto mais crítico que impacta o resultado final de confiabilidade e que requer atenção, seja através da revisão de um projeto, na substituição de um item de uma marca por outra de maior confiabilidade, pela revisão de um plano de manutenção, etc. São os chamados itens “*bad actors*” ou vilões que atuam contra o bom desempenho do sistema.

Considerando o período de um ano na Análise Analítica, que equivale a uma quilometragem de rodagem média da frota estudada de aproximadamente 1.477.000km, a confiabilidade atual obtida para a frota foi de apenas **0,35%**. Contabilizando uma frota constituída de 11 de trens (igual a 528 portas em operação), isso significa que ao término de um ano, se não for feita nenhuma manutenção corretiva ao longo do período, apenas 1,88 porta terá sobrevivido, ou pior, 1 porta, já que o arredondamento neste caso deve ser para baixo. Isso destaca a criticidade que o Sistema de Portas de uma frota representa, ainda mais quando se considera que basta ele apresentar um problema de impedimento de operação de uma das

portas de um trem para impedi-lo de partir, trazendo transtornos e muitos prejuízos para a Operação Comercial.

As imagens que se seguem ilustram exemplos de um relatório onde é possível visualizar a confiabilidade geral da função do sistema de portas e abaixo, a confiabilidade de cada um dos modos de falha. Num nível mais baixo, é possível visualizar a confiabilidade de cada item, sempre para uma dada quilometragem definida, cuja criticidade é possível de distinguir através de uma escala graduada de cores, na qual o verde mais escuro indica uma alta confiabilidade, o vermelho indica o oposto e as cores intermediárias tais como o verde claro, amarelo, laranja, etc., correspondem aos valores de confiabilidade intermediários.

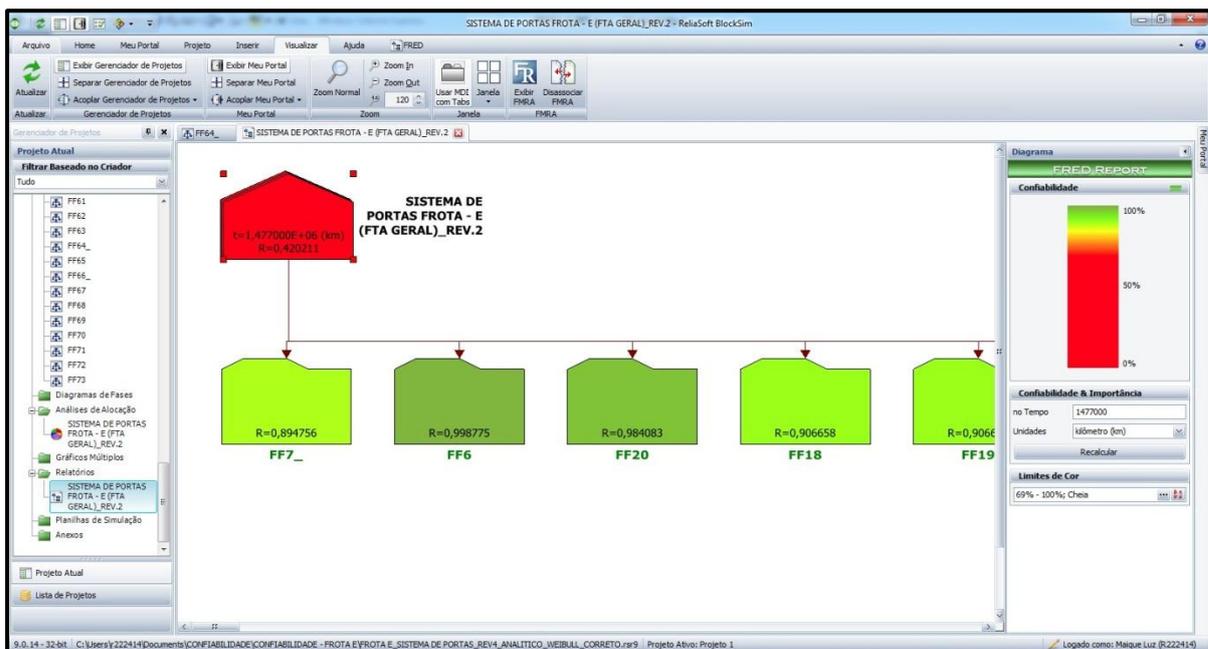


Fig. 15 – Tela do Blocksim® ilustrando ‘relatório FRED’ onde é possível visualizar a Confiabilidade Geral de um Sistema e de seus derivados

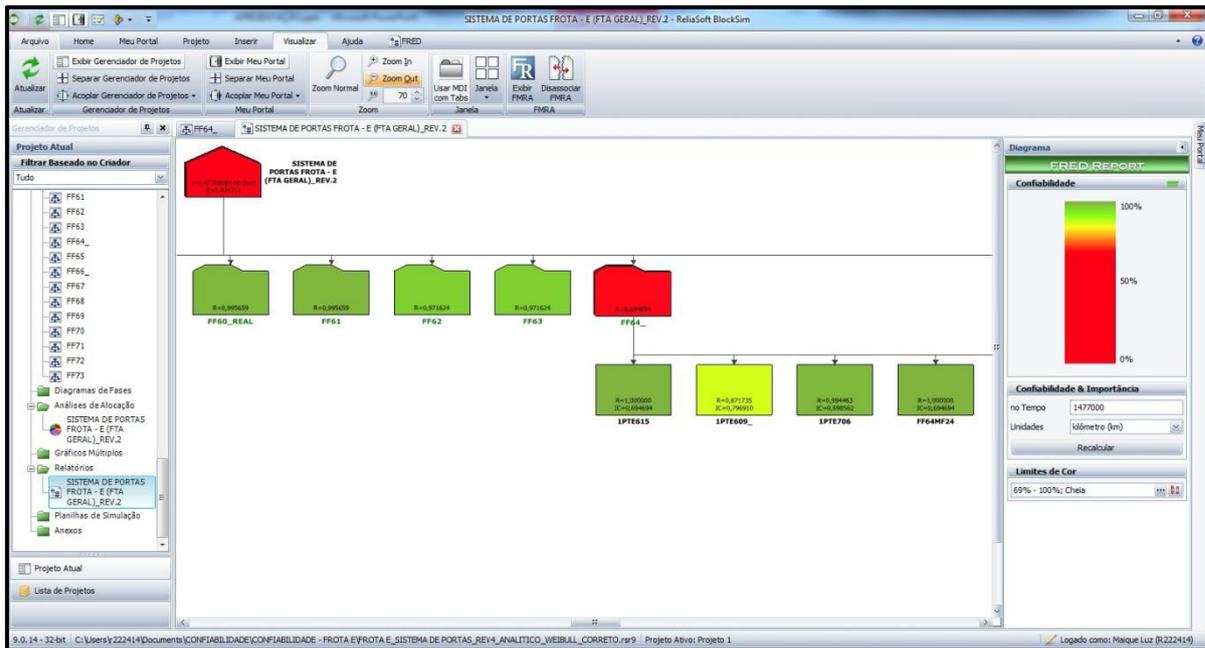


Fig. 16 – Tela do Blocksim® ilustrando ‘relatório FRED’ onde é possível visualizar a confiabilidade de alguns itens que compõem uma Árvore de Falha

2.1.8) Diagrama de Simulação – Levantamento dos Custos Atuais de Mão-de-Obra e de Peças com Manutenção Corretiva

Além de ser possível levantar quais são os itens/conjuntos que mais impactam na redução da confiabilidade do sistema como foi feito no Diagrama Analítico, também é possível, através do Diagrama de Simulação, levantar aqueles itens/conjuntos que mais custam em termos de peças e mão-de-obra empregada.

É importante frisar que, apesar da disponibilidade da frota para a operação ser um requisito muito importante para o Metrô-SP, este trabalho abordará economias com peças e mão-de-obra para um dado período, ao invés de abordar retornos qualitativos percebidos pelos usuários do sistema pela maior disponibilidade de trens, percepção esta complexa de se mensurar e que não é escopo deste trabalho.



AEAMESP



De fato, o Metrô-SP também deve empregar sua Engenharia para aumentar a confiabilidade e, conseqüentemente, aumentar a disponibilidade de trens na via, sem grandes dispêndios financeiros, mas em matéria de economia com manutenções corretivas, serão apresentados alguns cenários para se buscar aquele mais vantajoso, sem deixar de observar os novos valores de confiabilidade para cada um deles.

2.1.9) Estudo de Três Cenários – Melhora da Confiabilidade das Peças Mais Críticas e Nova Projeção dos Custos de Manutenção Corretiva do Sistema

O estudo de confiabilidade permite extrair dados quantitativos de qualquer cenário que se deseja, uma vez que, em se dispondo da estrutura lógica montada dentro do software, as diversas simulações permitirá se chegar a um cenário que mais se adeque as necessidades estratégias da Companhia no aumento da confiabilidade.

Neste estudo foram simulados três cenários, todos para um intervalo de dois anos de operação ou 3.000.000km rodados de frota. São eles:

- 1 - Aumento da confiabilidade dos seis itens/conjuntos que mais custam em manutenção corretiva
- 2 - Aumento da confiabilidade dos seis itens/conjuntos que causam o maior número de falhas
- 3 - Aumento da confiabilidade dos seis itens/conjuntos que mais provocam a indisponibilidade do Sistema de Portas

Antes das simulações, a seguir são apresentadas as relações dos itens/conjuntos mais críticos para a confiabilidade atual da frota, de acordo com cada cenário citado anteriormente.

Notar que os custos totais são os mesmos nas três próximas tabelas, pois representam os custos atuais da manutenção corretiva do sistema de portas. As três tabelas estão assim discriminadas apenas para mostrar a relação dos seis itens mais críticos para cada cenário.

Nome do Bloco	\$ Peça	N. peças instaladas na frota	RS FCI	RS DECI	RS DTCC	Dép. Média (Todos Eventos)	Dép. Média (sem MP OC x 3P)	# Esperado Falhas	# Peças que falham	# Peças que falham (ARRR, CIBA)	\$ Total peças no período	\$ Total peças no período	Nº Esperado de Eventos de BIODISPONIBILIDADE por Galvão	Eventos de Falhas do Sistema	Tempo Disponível do Bloco (h)	Tempo Disponível do Bloco (h)	Quantidade de MCS	Quantidade de MCS (# peças)	Quantidade de MCS (ARRR, CIBA)	Costo MO/manut corretiv	MC Equipos	MC (V)
1CME004	R\$ 18.043,39	66	2,24%	2,24%	2,98%	0,999884	0,999884	0,125	8,25	9	R\$ 162.390,51	R\$ 162.390,51	0	0,125	347,68975	299952,31	0,125	8,250	9	236,23	R\$ 2.126,07	R\$
1PTE013	R\$ 1.195,39	528	1,34%	1,34%	1,47%	0,999943	0,999943	0,061	32,208	33	R\$ 39.282,87	R\$ 39.282,87	0	0,061	171,22928	299926,77	0,061	32,208	33	236,23	R\$ 7.795,59	R\$
1PTE007	R\$ 2.412,64	396	0,72%	0,72%	0,80%	0,999969	0,999969	0,033	13,068	14	R\$ 36.576,96	R\$ 36.576,96	0	0,033	93,00836	299996,59	0,033	13,068	14	236,23	R\$ 3.397,22	R\$
1PTE005	R\$ 1.148,39	132	4,45%	4,45%	4,88%	0,999911	0,999911	0,203	26,796	27	R\$ 31.006,53	R\$ 31.006,53	0	0,203	570,12038	299943,87	0,203	26,796	27	236,23	R\$ 6.379,21	R\$
1PTE003	R\$ 980,03	132	5,02%	5,02%	5,48%	0,999787	0,999787	0,229	30,228	31	R\$ 27.900,93	R\$ 27.900,93	0	0,229	640,21544	299935,79	0,229	30,228	31	236,23	R\$ 7.323,13	R\$
1PTE004	R\$ 245,83	132	4,71%	4,71%	5,15%	0,999799	0,999799	0,215	28,38	29	R\$ 21.571,07	R\$ 21.571,07	0	0,215	602,03832	299937,96	0,215	28,380	29	236,23	R\$ 6.858,67	R\$
1PTE001	R\$ 400,98	528	1,62%	1,62%	1,69%	0,999922	0,999922	0,081	43,824	44	R\$ 18.521,12	R\$ 18.521,12	0	0,081	233,65922	299997,34	0,081	43,824	44	236,23	R\$ 6.384,16	R\$
1PSE0201	R\$	22	9,05%	9,05%	9,28%	0,999912	0,999912	0,413	9,886	10	R\$ 16.848,30	R\$ 16.848,30	0	0,413	263,807	2999736,09	0,413	9,886	10	236,23	R\$ 3.362,30	R\$
1PTE004	R\$	132	8,65%	8,65%	9,20%	0,999631	0,999631	0,395	194,28	105	R\$ 10.501,05	R\$ 10.501,05	0	0,395	1109,11866	2998891,88	0,395	194,280	105	236,23	R\$ 21.884,13	R\$
1PTE003	R\$	132	0,99%	0,99%	1,07%	0,999958	0,999958	0,045	5,94	6	R\$ 2.141,08	R\$ 2.141,08	0	0,045	125,09227	299981,81	0,045	5,940	6	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PSE0105	R\$	132	2,89%	2,89%	3,16%	0,999877	0,999877	0,132	2,904	3	R\$ 6.793,47	R\$ 6.793,47	0	0,132	368,69285	2999631,31	0,132	2,904	3	236,23	R\$ 708,69	R\$
1PTE021	R\$ 250,16	132	2,63%	2,63%	2,80%	0,999889	0,999889	0,12	15,84	16	R\$ 5.800,16	R\$ 5.800,16	0	0,12	234,40524	299965,6	0,12	15,840	16	236,23	R\$ 2.179,88	R\$
1PTE005	R\$ 183,21	132	11,18%	11,18%	12,23%	0,999523	0,999523	0,511	11,242	12	R\$ 2.187,72	R\$ 2.187,72	0	0,511	1430,39526	299869,65	0,511	11,242	12	236,23	R\$ 2.834,76	R\$
1PTE004	R\$ 180,01	132	3,18%	3,18%	3,49%	0,999864	0,999864	0,145	15,14	20	R\$ 2.000,20	R\$ 2.000,20	0	0,145	407,66242	299952,34	0,145	15,140	20	236,23	R\$ 4.724,60	R\$
1PTE009	R\$ 181,67	66	1,62%	1,62%	1,79%	0,999931	0,999931	0,074	9,768	10	R\$ 1.141,08	R\$ 1.141,08	0	0,074	207,49256	299974,74	0,074	9,768	10	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE009	R\$ 200,01	66	3,44%	3,44%	3,59%	0,999922	0,999922	0,084	5,94	6	R\$ 1,14	R\$ 1,14	0	0,084	207,49256	299974,74	0,084	5,940	6	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE001	R\$ 180,01	66	3,64%	3,64%	3,93%	0,999846	0,999846	0,166	10,956	11	R\$ 1,10	R\$ 1,10	0	0,166	207,49256	299974,74	0,166	10,956	11	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE021	R\$ 20,01	528	2,12%	2,12%	0,37%	0,999979	0,999979	0,097	51,216	52	R\$ 584,48	R\$ 584,48	0	0,097	247,49256	299974,74	0,097	51,216	52	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE010	R\$ 188,06	528	0,18%	0,18%	0,19%	0,999992	0,999992	0,009	4,224	5	R\$ 84,4	R\$ 84,4	0	0,009	22,49256	299999,74	0,009	4,224	5	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE002	R\$ 90,01	22	7,71%	7,71%	8,45%	0,999671	0,999671	0,352	7,744	8	R\$ 72,8	R\$ 72,8	0	0,352	88,49256	299974,74	0,352	7,744	8	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE003	R\$ 86,24	22	7,29%	7,29%	7,84%	0,99968	0,99968	0,333	7,328	8	R\$ 68,8	R\$ 68,8	0	0,333	88,49256	299974,74	0,333	7,328	8	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE005	R\$ 80,01	528	0,50%	0,50%	0,55%	0,999979	0,999979	0,023	12,144	13	R\$ 65,8	R\$ 65,8	0	0,023	58,49256	299999,74	0,023	12,144	13	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE006	R\$ 40,01	132	2,04%	2,04%	2,21%	0,999914	0,999914	0,093	12,276	13	R\$ 52,8	R\$ 52,8	0	0,093	28,49256	299999,74	0,093	12,276	13	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE009	R\$ 183,00	528	0,11%	0,11%	0,12%	0,999995	0,999995	0,005	2,64	3	R\$ 48,8	R\$ 48,8	0	0,005	12,49256	299999,74	0,005	2,640	3	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE020	R\$ 50,01	528	0,26%	0,26%	0,29%	0,999899	0,999899	0,012	6,336	7	R\$ 39,8	R\$ 39,8	0	0,012	17,49256	299999,74	0,012	6,336	7	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE004	R\$ 80,44	22	3,31%	3,31%	3,62%	0,999859	0,999859	0,151	3,322	4	R\$ 32,8	R\$ 32,8	0	0,151	37,49256	299974,74	0,151	3,322	4	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE003	R\$ 29,17	66	1,62%	1,62%	1,79%	0,999931	0,999931	0,074	4,884	5	R\$ 14,8	R\$ 14,8	0	0,074	17,49256	299974,74	0,074	4,884	5	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE001	R\$ 3,46	66	3,13%	3,13%	3,45%	0,999866	0,999866	0,143	9,438	10	R\$ 24,8	R\$ 24,8	0	0,143	27,49256	299974,74	0,143	9,438	10	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE001	R\$ 2,72	22	5,26%	5,26%	5,78%	0,999775	0,999775	0,24	5,28	6	R\$ 18,8	R\$ 18,8	0	0,24	27,49256	299974,74	0,24	5,280	6	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE001	R\$ 86,24	22	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	R\$ 0,8	R\$ 0,8	0	0	0	299999,74	0	0	0	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE005	R\$ 27,85	66	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	R\$ 0,8	R\$ 0,8	0	0	0	299999,74	0	0	0	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
1PTE003	R\$ 45,17	66	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	R\$ 0,8	R\$ 0,8	0	0	0	299999,74	0	0	0	236,23	R\$ 1.417,38	R\$
\$ TOTAL PEÇAS											R\$ 398.054,32											
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA																						R\$ 120.477,30
\$ TOTAL																						R\$ 518.531,62
Nome do Bloco								# Esperado Falhas	# Peças que falham													\$ Total peças no período
1CMEAAA								0,125	8,25													R\$ 162.390,51
1PTEAAA								0,061	32,208													R\$ 39.282,87
1PTEBBB								0,033	13,068													R\$ 36.576,96
1PTECCC								0,203	26,796													R\$ 31.006,53
1PTEDDD								0,229	30,228													R\$ 27.900,93
1PTEEEE								0,215	28,38													R\$ 21.571,07

Tab. 1 – Relação de códigos dos seis itens/conjuntos mais caros com manutenção corretiva para a confiabilidade atual e custos atuais totais com manutenção para dois anos de operação

CONTABILIDADE PEÇAS, BOMAS, REV. E ENCAD. ARTIGO, P.F.F.A. (Modo de Contabilidade) - Microsoft Excel

Nome do Bloco	\$ Peça	N. peças Instaladas na Frota	RS FCI	RS DECI	RS DTICI	Dep. Médio (Todos Eventos)	Dep. Médio (sem MP, OC e IP)	# Esperado	# Peças que falham (ABRECI, CBAA)	\$ Total peças no período	\$ Total peças no período	Nº Esperado de Eventos de INDISPONIBILIDADE por Galvão	Eventos de Parada do Sistema	Tempo Indisponível do Bloco (h)	Tempo Disponível do Bloco (h)	Quantidade de MCs	Quantidade de MCs (ABRECI, CBAA)	Quantidade de MCs (ABRECI, CBAA)	Custo MO/munnt correto	MC Equipos	MC (VA)
1PTTEZZA	R\$ 100,01	264	8,65%	8,65%	0,50%	0,99961	0,99963	0,395	104,28	105	R\$ 10.501,05	0	0,395	1109,11866	298880,88	0,395	104,280	105	236,23	R\$ 24.894,15	R\$ 2
1PTEOZI	R\$ 20,01	528	2,12%	2,12%	0,53%	0,99979	0,99979	0,097	51,216	52	R\$ 1.040,52	0	0,097	63,0315	299957,07	0,097	51,216	52	236,23	R\$ 12.362,30	R\$ 12
1PTEAAB	R\$ 420,98	528	1,82%	1,82%	1,89%	0,99922	0,99922	0,083	43,824	44	R\$ 18.523,12	0	0,083	232,66922	299976,34	0,083	43,824	44	236,23	R\$ 10.394,13	R\$ 11
1PTEAAA	R\$ 1.190,39	528	1,34%	1,34%	1,47%	0,99943	0,99943	0,061	32,208	33	R\$ 39.282,87	0	0,061	171,22928	299828,77	0,061	32,208	33	236,23	R\$ 7.795,59	R\$ 11
1PTEEDD	R\$ 990,03	132	5,02%	5,02%	5,48%	0,99787	0,99787	0,229	20,228	21	R\$ 27.900,93	0	0,229	440,21544	299958,29	0,229	30,228	31	236,23	R\$ 7.523,13	R\$ 12
1PTEEEE	R\$ 132,00	132	4,71%	4,71%	5,15%	0,99799	0,99799	0,215	28,38	29	R\$ 21.571,07	0	0,215	602,03832	299937,56	0,215	28,380	29	236,23	R\$ 6.850,67	R\$ 8
1PTE405	R\$ 132,00	132	4,45%	4,45%	4,88%	0,99981	0,99981	0,203	26,796	27	R\$ 31.006,53	0	0,203	570,128308	299949,87	0,203	26,796	27	236,23	R\$ 6.378,21	R\$ 8
1PTE304	R\$ 132,00	132	3,18%	3,18%	3,49%	0,99984	0,99984	0,145	19,14	20	R\$ 2.000,20	0	0,145	407,664272	299952,34	0,145	19,140	20	236,23	R\$ 4.724,60	R\$ 8
1PTE8021	R\$ 132,00	132	2,63%	2,63%	2,86%	0,99988	0,99988	0,12	15,84	16	R\$ 5.600,16	0	0,12	334,404246	299965,6	0,12	15,840	16	236,23	R\$ 3.779,68	R\$ 8
1PTE020	R\$ 2.620,00	22	0,72%	0,72%	0,80%	0,99969	0,99969	0,033	13,608	14	R\$ 36.576,96	0	0,033	93,008636	299996,99	0,033	13,608	14	236,23	R\$ 2.397,22	R\$ 8
1PTE306	R\$ 40,01	22	2,04%	2,04%	2,21%	0,99954	0,99954	0,093	12,276	13	R\$ 320,13	0	0,093	257,999706	2999742	0,093	12,276	13	236,23	R\$ 3.070,99	R\$ 8
1PTE00	R\$ 50,01	528	0,50%	0,50%	0,55%	0,99979	0,99979	0,023	12,144	13	R\$ 650,13	0	0,023	63,801932	299936,2	0,023	12,144	13	236,23	R\$ 3.070,99	R\$ 8
1PTE905	R\$ 182,31	22	11,19%	11,19%	12,25%	0,99952	0,99952	0,511	11,242	12	R\$ 2.187,72	0	0,511	1430,355276	298856,65	0,511	11,242	12	236,23	R\$ 2.834,76	R\$ 8
1PTE501	R\$ 100,01	66	1,84%	1,84%	1,89%	0,99961	0,99961	0,133	9,864	10	R\$ 1.040,52	0	0,133	163,09024	299938,04	0,133	9,864	10	236,23	R\$ 2.362,30	R\$ 8
1SE21901	R\$ 161,67	132	1,62%	1,62%	1,79%	0,99931	0,99931	0,074	9,768	10	R\$ 1.616,70	0	0,074	208,458356	299921,52	0,074	9,768	10	236,23	R\$ 2.362,30	R\$ 8
1PTE701	R\$ 3,48	66	3,13%	3,13%	3,45%	0,99986	0,99986	0,143	9,438	10	R\$ 34,60	0	0,143	403,116245	299996,68	0,143	9,438	10	236,23	R\$ 3.700,20	R\$ 8
1PSE3015	R\$ 1.040,39	22	0,95%	0,95%	0,95%	0,99912	0,99912	0,113	9,864	10	R\$ 14.848,20	0	0,113	463,466726	299964,46	0,113	9,864	10	236,23	R\$ 3.700,20	R\$ 8
1PTE021	R\$ 1.040,39	66	2,74%	2,74%	2,86%	0,99984	0,99984	0,125	8,25	9	R\$ 162,39	0	0,125	347,688935	299952,31	0,125	8,250	9	236,23	R\$ 2.126,07	R\$ 8
1PTE902	R\$ 90,01	22	7,71%	7,71%	8,45%	0,99967	0,99967	0,152	7,74	8	R\$ 78,00	0	0,152	363,90252	299999,99	0,152	7,740	8	236,23	R\$ 1.889,84	R\$ 8
1PTE903	R\$ 86,34	22	7,29%	7,29%	7,86%	0,99961	0,99961	0,133	7,74	8	R\$ 69,00	0	0,133	320,15384	299976,94	0,133	7,740	8	236,23	R\$ 1.889,84	R\$ 8
1PTE020	R\$ 50,01	528	0,26%	0,26%	0,29%	0,99988	0,99988	0,012	6,336	7	R\$ 350	0	0,012	24,404246	299936,2	0,012	6,336	7	236,23	R\$ 3.070,99	R\$ 8
1PTE709	R\$ 1.190,18	132	0,99%	0,99%	1,07%	0,99958	0,99958	0,045	5,94	6	R\$ 124	0	0,045	96,905276	299913,7	0,045	5,940	6	236,23	R\$ 1.889,84	R\$ 8
1PTE603	R\$ 2,72	22	3,26%	3,26%	3,55%	0,99975	0,99975	0,24	5,28	6	R\$ 16,32	0	0,24	675,012483	299932,99	0,24	5,280	6	236,23	R\$ 1.417,38	R\$ 8
1PTE703	R\$ 29,17	66	1,62%	1,62%	1,79%	0,99991	0,99991	0,074	4,884	5	R\$ 145	0	0,074	180,16384	299976,94	0,074	4,884	5	236,23	R\$ 1.417,38	R\$ 8
1PTE1010	R\$ 168,06	528	0,18%	0,18%	0,19%	0,99995	0,99995	0,008	4,224	5	R\$ 480	0	0,008	16,304246	299996,68	0,008	4,224	5	236,23	R\$ 3.070,99	R\$ 8
1PTE904	R\$ 80,44	22	3,31%	3,31%	3,62%	0,99989	0,99989	0,151	3,322	4	R\$ 321	0	0,151	423,2017	299976,68	0,151	3,322	4	236,23	R\$ 1.417,38	R\$ 8
1PSE3015	R\$ 2.264,49	22	2,89%	2,89%	3,16%	0,99987	0,99987	0,132	2,904	3	R\$ 793,47	0	0,132	368,65885	299951,31	0,132	2,904	3	236,23	R\$ 708,69	R\$ 8
1PTE009	R\$ 161,00	528	0,11%	0,11%	0,12%	0,99995	0,99995	0,005	2,64	3	R\$ 483	0	0,005	18,304246	299996,68	0,005	2,640	3	236,23	R\$ 3.070,99	R\$ 8
1PTE901	R\$ 86,34	22	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	R\$ 0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1PTE905	R\$ 182,31	22	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	R\$ 0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1PTE702	R\$ 29,17	66	0,00%	0,00%	0,00%	1	1	0	0	0	R\$ 0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nome do Bloco	Esperado Falhas	# Peças que falham	\$ Total peças no período
1PTEZZA	0,395	104,28	R\$ 10.501,05
1PTEOZI	0,097	51,216	R\$ 1.040,52
1PTEAAB	0,083	43,824	R\$ 18.523,12
1PTEAAA	0,061	32,208	R\$ 39.282,87
1PTEDD	0,229	30,228	R\$ 27.900,93
1PTEEEE	0,215	28,38	R\$ 21.571,07

\$ TOTAL PEÇAS	R\$ 398.054,32
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA	R\$ 120.477,30
\$ TOTAL	R\$ 518.531,62

Tab. 2 – Relação de códigos dos seis itens/conjuntos com maior número de falhas corretivas para a confiabilidade atual e custos atuais totais para dois anos de operação

CONTABILIDADE PEÇAS, BOMAS, REV. E ENCAD. ARTIGO, P.F.F.A. (Modo de Contabilidade) - Microsoft Excel

Nome do Bloco	RS FCI	# Esperado	# Peças que falham	\$ Total peças no período
1PTEA05	11,19%	0,511	0,511	R\$ 2.187,72
1PSEFFFF	9,05%	0,413	0,413	R\$ 16.848,30
1PTEZZA	8,65%	0,395	0,395	R\$ 10.501,05
1PTEAA2	7,71%	0,352	0,352	R\$ 720,08
1PTEAAA3	7,29%	0,333	0,333	R\$ 690,72
1PTEXXX1	5,26%	0,24	0,24	R\$ 16,32

\$ TOTAL PEÇAS	R\$ 398.054,32
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA	R\$ 120.477,30
\$ TOTAL	R\$ 518.531,62

Tab. 3 – Relação de códigos dos seis itens/conjuntos que mais causam indisponibilidade no sistema de portas para a confiabilidade atual e custos atuais totais para dois anos de operação

Para efeito de simulação, o novo valor de confiabilidade adotado somente para os seis itens/conjuntos mais críticos será de **R(t)=0,998** para um ano de operação, ou seja, para que tenhamos as economias com custos de manutenção corretiva que serão apresentadas na sequência, este será o valor da confiabilidade a ser perseguido pela implementação de novos projetos de itens/conjuntos ou processos com vias a aumentar a confiabilidade deste grupo crítico.

Cabe registrar que os códigos reais aqui apresentados foram modificados mas possuem relação real com a manutenção corretiva da frota estudada.

2.1.9.1) Aumento da Confiabilidade dos Seis Itens/Conjuntos que Mais Custam em Manutenção Corretiva

A tabela 4 a seguir relaciona a confiabilidade dos itens/conjunto atual e projetada para este cenário.

FINALIDADE	R(t)_atual	R(t)_simu	R(t)_SIS_atual	R(t)_SIS_simu
1CMEAAA	96,21%	99,80%	0,3560%	1,9138%
1PTEAAA	97,68%	99,80%		
1PTEBBB	98,48%	99,80%		
1PTECCC	91,62%	99,80%		
1PTEDDD	90,36%	99,80%		
1PTEEEE	89,67%	99,80%		

Tab. 4 – Valores de Confiabilidade atual e simulada dos seis respectivos itens/conjuntos que Mais custam à Manutenção Corretiva e a Confiabilidade do Sistema

Após simular a melhoria dos seis itens/conjuntos relacionados nas tabelas 1 e 4, os custos previstos com manutenção corretiva foram atualizados. A diferença de custos entre a

confiabilidade atual (antes) e a nova confiabilidade após melhorar os seis itens/conjuntos mais críticos (depois) é:

	ANTES	DEPOIS	DIFERENÇA
\$ TOTAL PEÇAS	R\$ 398.054,32	R\$ 121.095,96	R\$ 276.958,36
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA	R\$ 120.477,30	R\$ 94.255,77	R\$ 26.221,53
\$TOTAL	R\$ 518.531,62	R\$ 215.351,73	R\$ 303.179,89

Tab. 5 – Novos custos com manutenção corretiva em dois anos de operação após melhorar a Confiabilidade dos Seis Itens/Conjuntos Mais Caros

2.1.9.2) Aumento da Confiabilidade dos Seis Itens/Conjuntos que Causam o Maior Número de Falhas

A tabela 6 a seguir relaciona a Confiabilidade dos Itens/Conjunto atual e projetada para este cenário.

FINALIDADE	R(t)_atual	R(t)_simu	R(t)_SIS_atual	R(t)_SIS_simu
1PTEZZA	83,65%	99,80%	0,3560%	2,0360%
1PTEOZI	97,38%	99,80%		
1PTEAAB	95,56%	99,80%		
1PTEAAA	97,68%	99,80%		
1PTEDDD	90,36%	99,80%		
1PTEEEE	89,67%	99,80%		

Tab. 6 – Valores de Confiabilidade atual e simulada dos seis respectivos itens/conjuntos que Mais Falham em Manutenção Corretiva e a Confiabilidade do Sistema

Após simular a melhoria dos seis itens/conjuntos relacionados nas tabelas 2 e 6, os custos previstos com manutenção corretiva foram atualizados. A diferença de custos entre a confiabilidade atual (antes) e a nova confiabilidade após melhorar os seis itens/conjuntos mais críticos (depois) é:

	ANTES	DEPOIS	DIFERENÇA
\$ TOTAL PEÇAS	R\$ 398.054,32	R\$ 354.705,37	R\$ 43.348,95
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA	R\$ 120.477,30	R\$ 87.641,33	R\$ 32.835,97
\$TOTAL	R\$ 518.531,62	R\$ 442.346,70	R\$ 76.184,92

Tab. 7 – Novos custos com manutenção corretiva em dois anos de operação após melhorar a Confiabilidade dos Seis Itens/Conjuntos que Causam o Maior Número de Falhas

2.1.9.3) Aumento da Confiabilidade dos Seis Itens/Conjuntos que Mais Causam Indisponibilidade no Sistema de Portas

A tabela 8 a seguir relaciona a Confiabilidade dos Itens/Conjunto atual e projetada para este cenário.

FINALIDADE	R(t)_atual	R(t)_simu	R(t)_SIS_atual	R(t)_SIS_simu
1PTEAO5	78,59%	99,80%	0,3560%	2,9148%
1PSEFFFF	96,86%	99,80%		
1PTEZZA	83,65%	99,80%		
1PTEAA2	91,51%	99,80%		
APTEAA3	86,59%	99,80%		
1PTEXXX1	94,73%	99,80%		

Tab. 8 – Valores de Confiabilidade atual e simulada dos seis respectivos itens/conjuntos que Mais Causam Indisponibilidade no Sistema e a Confiabilidade do Sistema

Após simular a melhoria dos seis itens/conjuntos relacionados nas tabelas 3 e 8, os custos previstos com manutenção corretiva foram atualizados. A diferença de custos entre a confiabilidade atual (antes) e a nova confiabilidade após melhorar os seis itens/conjuntos mais críticos (depois) é:

	ANTES	DEPOIS	DIFERENÇA
\$ TOTAL PEÇAS	R\$ 398.054,32	R\$ 278.889,69	R\$ 119.164,63
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA	R\$ 120.477,30	R\$ 62.364,72	R\$ 58.112,58
\$TOTAL	R\$ 518.531,62	R\$ 341.254,41	R\$ 177.277,21

Tab. 9 – Novos custos com manutenção corretiva em dois anos de operação após melhorar a Confiabilidade dos Seis Itens/Conjuntos que Mais Causam Indisponibilidade no Sistema de Portas

2.1.9.4) Aumento da Confiabilidade de Todos os Seis Itens/Conjuntos Mais Críticos dos Três Cenários Anteriores Reunidos

A tabela 10 a seguir relaciona a confiabilidade dos itens/conjunto atual e projetada para este cenário adicional.

FINALIDADE	R(t)_atual	R(t)_simu	R(t)_SIS_atual	R(t)_SIS_simu
1CMEAAA	96,21%	99,80%	0,3560%	21,4234%
1PTEAAA	97,68%	99,80%		
1PTEBBB	98,48%	99,80%		
1PTECCC	91,62%	99,80%		
1PTEDDD	90,36%	99,80%		
1PTEEEE	89,67%	99,80%		
1PTEZZA	83,65%	99,80%		
1PTE0ZI	97,38%	99,80%		
1PTEAAB	95,56%	99,80%		
1PTEAAA	97,68%	99,80%		
1PTEDDD	90,36%	99,80%		
1PTEEEE	89,67%	99,80%		
1PTEAO5	78,59%	99,80%		
1PSEFFFF	96,86%	99,80%		
1PTEZZA	83,65%	99,80%		
1PTEAA2	91,51%	99,80%		
APTEAA3	86,59%	99,80%		
1PTEXXX1	94,73%	99,80%		

Tab. 10 – Valores de confiabilidade atual e simulada de Todos os Seis Itens/Conjuntos Mais Críticos de Todos os Três Cenários Anteriores Reunidos

Notar que os códigos 1PTEAAA, 1PTEDDD, 1PTEEEE e 1PTEZZA se repetem e por isso, o número de itens/conjuntos com confiabilidade aumentada para $R(t) = 0,998$ ou **99,80%** é quatorze de fato e não dezoito.

Após simular a melhoria de todos os itens/conjuntos relacionados na tab. 10, os custos previstos com manutenção corretiva foram atualizados. A diferença de custos entre a confiabilidade atual (antes) e a nova confiabilidade após melhorar os itens/conjuntos relacionados (depois) é:

	ANTES	DEPOIS	DIFERENÇA
\$ TOTAL PEÇAS	R\$ 398.054,32	R\$ 82.648,87	R\$ 315.405,45
\$ TOTAL MÃO-DE-OBRA	R\$ 120.477,30	R\$ 42.521,40	R\$ 77.955,90
\$TOTAL	R\$ 518.531,62	R\$ 125.170,27	R\$ 393.361,35

Tab. 11 – Novos custos com manutenção corretiva em dois anos de operação após melhorar a Confiabilidade dos Seis Itens Mais Críticos de Cada Um dos Três Cenários Reunidos

3) ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando e comparando as tabelas 5, 7 e 9, é fácil deduzir que a maior economia é obtida pelo critério do maior custo com peças para um período de dois anos de operação, com um total de **R\$ 303.179,89**, e que a confiabilidade do sistema é estimada em **1,9138%** para um ano de operação.

Para cada um dos três critérios, também foram apresentados os novos valores de confiabilidade nas tabelas 4, 6 e 8, respectivamente, e se adotássemos o critério da maior confiabilidade, o cenário dos Seis Itens/Conjuntos que Mais Causam Indisponibilidade no

Sistema de Portas seria o escolhido, com uma confiabilidade aumentada para **2,9148%** para um ano de operação.

De fato, os valores de confiabilidade apresentados em qualquer um dos três cenários estudados podem ser considerados muito baixos, pois se fosse possível manter todos os trens da frota operando mesmo com falhas no sistema de portas, ao término de um ano, poucas portas estariam operando.

Isso é um indicativo de que outros itens/conjuntos, além dos seis mais críticos, também estão prejudicando a confiabilidade total do sistema de portas, e que se quisermos aumentar a disponibilidade de trens, estes itens/conjuntos críticos também devem ser tratados.

A relação destes itens/conjuntos adicionais não está discriminada neste trabalho, mas se optássemos por aumentar a confiabilidade do sistema de portas para **21,4234%**, e por consequência obter uma economia de **R\$ 393.361,35** em dois anos de operação, todos os 14 itens/conjuntos relacionados na Tab. 10 deveriam ter sua confiabilidade aumentada.

Curiosamente, a economia total não seria muito maior do que aquela obtida pelo cenário de melhoria de apenas Seis Itens que Mais Custam na Manutenção Corretiva, i.e., em se aumentando a confiabilidade de mais 8 itens/conjuntos além daqueles já citados na Tab. 4, a economia com manutenção teria um aumento de “apenas” **R\$90.181,46** em dois anos de operação, embora a confiabilidade tivesse passado de **1,9138%** para **21,4234%** para um ano de operação.

Com isso, caso se decida por reduzir custos com manutenção com a menor interferência no projeto atual do trem, o cenário dos seis itens/conjuntos que mais custam é o que deve ser perseguido, enquanto que, na busca de maior disponibilidade de trens pelo maior desempenho do sistema de portas, mais de seis itens/conjuntos que mais causam



AEAMESP



indisponibilidade do sistema devem ser tratados, até se chegar a um valor de confiabilidade satisfatória que atenda as necessidades da operação. Cabe registrar que este trabalho abrange 82 itens/conjuntos para o Sistema de Portas da Frota 'E' e que o cenário estudado considerou, por opção, apenas os seis mais críticos.

Independente do cenário escolhido, os resultados apresentam uma boa aproximação, uma vez que a ferramenta da confiabilidade por si trabalha com probabilidades. Porém, um ponto interessante é poder conhecer com precisão onde é necessário melhorar, i.e., em qual item/conjunto e com qual valor de confiabilidade, visando resultados de confiabilidade e de economia com peças e mão-de-obra já pré-estabelecidos.

Alguns outros resultados também seriam possíveis de extrair com a Engenharia da Confiabilidade neste estudo utilizando-se destas mesmas ferramentas. São eles:

- ✓ Informações das equipes de manutenção como o número de chamadas abertas x número de chamadas aceitas;
- ✓ Custos com atrasos logísticos na reposição de estoques;
- ✓ O valor da indisponibilidade de cada item/conjunto que constitui todo o sistema;
- ✓ O número de unidades em paralelo equivalentes (redundância) necessárias para alcançar um valor de confiabilidade desejado, quando a concepção de projeto assim permitir;
- ✓ O dispêndio de mão-de-obra com inspeções;
- ✓ Outros.



AEAMESP



4) CONCLUSÕES

A Engenharia da Confiabilidade é flexível para oferecer otimização na Manutenção do Material Rodante do Metrô-SP, de acordo com a estratégia mais conveniente definida pela companhia, em função de suas necessidades e recursos disponíveis.

Este trabalho é importante por concluir que não é somente pelo estudo de um sistema completo, neste caso um trem constituído de treze subsistemas, que será possível extrair economias significativas com manutenções.

Esta é uma constatação importante, quando consideramos que a Gerência de Manutenção do Metrô-SP não teve o sucesso esperado com a Engenharia da Confiabilidade quando direcionou uma significativa parte de sua mão-de-obra de engenharia e de oficinas para estudar sistemas completos e buscou a gestão simultânea de um amplo parque de ativos, pois vem corroborar que a aplicação gradual dos conceitos e ferramentas também extraem resultados apreciáveis, de acordo com a decisão do quanto se deseja investir nesta frente de trabalho.

Basta observarmos que este estudo focou em um único subsistema do trem e que, em se melhorando a confiabilidade de apenas seis itens, a economia estimada já será de aproximadamente **R\$300.000,00** em dois anos de operação da frota. Estes cálculos são necessários para permitir uma tomada de decisão mais acertada por parte da alta administração da manutenção para atender metas financeiras.

Outra conclusão a destacar é que, por intermédio da Engenharia da Confiabilidade que possibilitou definir valores de confiabilidade do Sistema de Portas, foi possível quantificar



AEAMESP



quão crítico é este sistema para o funcionamento do trem, reforçando que o Sistema de Portas é sim um dos que mais interferem na operação do trem, se não o mais.

Em termos de dados de apontamentos em bancos de dados, diferente do que se acreditava, verificou-se que não são obrigatórios apontamentos detalhados e aprofundados para se iniciar um diagnóstico da confiabilidade dos diversos subsistemas que constituem um trem, muito embora seja verdade que, quanto mais ajustado o banco de dados estiver, mais precisos serão os resultados. De fato, este trabalho não avançou em níveis mais profundos de causas de falhas, justamente por ainda não dispor de apontamentos mais detalhados, mas nem por isso deixou de identificar onde centrar esforços para melhorar o desempenho do Sistema de Portas.

Por fim, concluímos que a Engenharia da Confiabilidade é uma área que oferece recursos muito maiores do que os que foram empregados neste trabalho e mostrou que, mesmo empregando-a em apenas Manutenções Corretivas, ainda foi possível extrair alternativas viáveis para minimizar suas ocorrências, reduzir custos e aumentar a disponibilidade de trens.

5) RECOMENDAÇÕES

Com o objetivo de se obter resultados ainda mais próximos do real neste trabalho, bem como para extrair maiores resultados financeiros em outros sistemas, as seguintes recomendações são apresentadas:



AEAMESP



- Estudar e aplicar a Engenharia da Confiabilidade em outros sistemas mais críticos do Material Rodante segundo uma ordem de prioridade técnica e de acordo com a mão-de-obra de engenharia disponível;
- Aprimorar a confiabilidade dos “bad actors” (ou itens/conjuntos vilões) identificados, instalá-los nos trens da frota, monitorar o desempenho e prosseguir na Melhoria Contínua com foco na Confiabilidade;
- Aprimorar os apontamentos de falhas no banco de dados para possibilitar resultados cada vez mais próximos do real;
- Considerar o dispêndio real de Hxh para cada atividade de manutenção corretiva para obtenção de resultados mais próximos do real.

6) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Applied Life Data Analysis – By Wayne Nelson
- Handbook of Reliability Engineering and Management – Second Edition – W. Grant Ireson, Clyde F. Coombs Jr. and Richard Y. Moss
- Reliability Engineering – by Elsayed A. Elsayed
- Reliability Engineering Handbook – Vols. 1 & 2, by Dimitry Kececioglu
- Reliability and Life Testing Handbook – Vols. 1 & 2, by Dimitry Kececioglu
- Oreda – Offshore Reliability Data Handbook – 4th Edition
- Presentation Handouts – Reliability Seminar – CRP Intensive - Reliasoft
- Probability, Statistics and Reliability for Engineers and Scientists – Bilal M. Ayyub – Richard H. Mccuem



AEAMESP



- Statistical Methods for Reliability Data – by William K. Meeker and Luis A. Escobar