

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

FABIANO PARIZOTTO DOS SANTOS

**ANÁLISE DE FALHAS BASEADA EM ENGENHARIA DA
CONFIABILIDADE EM TROCADOR DE CALOR DO PROCESSO DE
UREIA EM PLANTA PETROQUÍMICA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

Curitiba
2015

FABIANO PARIZOTTO DOS SANTOS

**ANÁLISE DE FALHAS BASEADA EM ENGENHARIA DA
CONFIABILIDADE EM TROCADOR DE CALOR DO PROCESSO DE
UREIA EM PLANTA PETROQUÍMICA**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

Curitiba
2015

RESUMO

SANTOS, Fabiano Parizotto dos. **ANÁLISE DE FALHAS BASEADA EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE EM TROCADOR DE CALOR DO PROCESSO DE UREIA EM PLANTA PETROQUÍMICA.** Monografia do Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

No decorrer de mais de 30 anos de operação, o trocador de calor de alta pressão do quarto estágio do compressor de gás carbônico vem apresentando vazamento pelos tubos de troca térmica durante operação normal devido a corrosão no feixe tubular, cuja falha provoca parada do processo produtivo de ureia gerando grande perda financeira e altos custos de manutenção. O objetivo deste estudo foi combinar técnicas de análise da engenharia da confiabilidade: Análise de Dados de Vida; Simulação via Diagramas de Bloco de Confiabilidade e; Análise de Sistemas Reparáveis com o modelo Crow-AMSAA para a avaliação de um processo de melhoria no trocador de calor por meio da substituição dos feixes de tubos de aço inoxidável pelos de aço carbono. Como resultado foi comprovado que a melhoria do material dos feixes melhorou o desempenho do trocador, porém, a política de manutenção empregada no sistema modificado estava contribuindo pelo aumento da concentração de falhas.

Palavras-chave: Confiabilidade; Trocador de Calor; Análise de dados de vida; Análise de Weibull; Análise da Árvore de Falhas, Modelo Crow-AMSAA

ABSTRACT

SANTOS, Fabiano Parizotto dos. **ANALYSIS BASED FAILURE TO ENGINEERING THE RELIABILITY OF EXCHANGER UREA PROCESS OF HEAT IN PETROCHEMICAL PLANT**. Monograph of Specialization in Reliability Engineering of Academic Department of Electrical Engineering at Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2015.

During more than 30 years of operation the high-pressure heat exchanger of the fourth stage of the carbonic gas compressor has shown leaking in the tubes during normal operation due to corrosive process in tube bundle, whose failure causes shutdown of the production process of urea generating great financial loss and high maintenance costs. The objective of this study was to combine analytical techniques of reliability engineering: Life Data Analysis; Simulation via Reliability Block Diagrams and; Analyzing repairable systems with Crow-AMSAA model for the evaluation of a process improved in the heat exchanger by replacement of bundles of stainless steel by carbon steel tubes. As a result it was confirmed that the improvement of the material of the beams improved the performance of the heat exchanger, however, the maintenance policy used in the modified system was contributing by increasing the concentration of failures.

Keywords: Reliability. Heat exchanger. Life Data Analysis; Weibull Analysis; Fault Tree Analysis, Crow-AMSAA model

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Histórico de intervenções do trocador do quarto estágio do compressor de CO ₂	15
Tabela 2 Histórico de intervenções do trocador do quarto estágio do compressor de CO ₂ (aço inoxidável – sistema original).....	17
Tabela 3 C(t) e F(t) obtidas pelo processo simulacional	19
Tabela 4 Tempos até falhar	23
Tabela 5 Relatório de resultados simplificados	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO2	3
Figura 2 Fluxograma de processo do compressor de CO2.....	4
Figura 3 Curva da Taxa de Falha ou Curva da Banheira $\lambda(t) = f(t)/R(t)$ vale para qualquer distribuição	6
Figura 4 Curva Weibull pdf com $\beta < 1$, $\beta = 1$ e $\beta > 1$	9
Figura 5 Curva Weibull pdf variando valores de η	10
Figura 6 Diagrama lógico FTA.....	11
Figura 7 FTA trocador do quarto estágio do compressor de CO2.....	12
Figura 8 Falha de um tubo do trocador do quarto estágio do compressor de CO2 devido à corrosão sob depósitos	14
Figura 9 RBD do trocador do 4º estágio do compressor de CO2	19

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Curva $F(t)$ do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO ₂	17
Gráfico 2 Curva pdf do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO ₂	17
Gráfico 3 Curva $C(t)$ do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO ₂	17
Gráfico 4 Taxa de Falha do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO ₂ ...	17
Gráfico 5 Comparativo da pdf do feixe em aço inoxidável versus feixe em aço carbono	18
Gráfico 6 TMEF acumulado versus pelo modelo Crow-AMSAA instantâneo obtidos ...	24
Gráfico 7 TMEF versus tempo e limites de confiança bilaterais.	25

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Trocadores de calor.....	2
2.1	Descrição do sistema	3
3	Engenharia da Confiabilidade	4
3.1	Análise do ciclo de vida de um sistema	5
3.2	Métricas ou medidas de confiabilidade e risco.....	6
3.3	Definições ligadas à confiabilidade	8
3.4	Características da distribuição de Weibull	8
3.5	Árvore de falhas (FTA)	10
4	Histórico de falhas e metodologia FTA/ADV.....	11
4.1	FTA do trocador de calor do quarto estágio do compressor de CO ₂	11
4.2	ADV do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO ₂	14
5	Análise da confiabilidade do sistema - processo simulacional.....	18
5.1	Análise dos custos de manutenção	20
5.1.1	– Desvio padrão:	20
5.1.2	Tempo médio:	20
5.1.3	Custo de manutenção preventiva / corretiva:	20
5.1.4	Determinação do tempo ótimo de substituição:	21
6	Quarta etapa - Aplicação do Modelo Crow-AMSAA (PNHP)	21
7	Considerações finais	25
8	Propostas para estudos futuros	27
	REFERÊNCIAS	28

1 Introdução

O presente trabalho apresenta uma análise de falhas baseada em um estudo de confiabilidade utilizando um modelo probabilístico de Weibull. Para isso leva em consideração o histórico de intervenções de manutenção no trocador de calor do quarto estágio do compressor de gás carbônico (CO₂) que opera em alta pressão, sendo CO₂ no lado dos tubos e água de resfriamento (AGR) no lado casco. Este equipamento tem uma importante função no processo de produção de ureia e quando ocorrem falhas no mesmo a produção é interrompida, gerando uma perda financeira significativa, estimada em R\$ 2 milhões/dia baseado no valor de R\$1.000,00/tonelada de ureia e na produção diária de 1975 toneladas.

Para chegar aos resultados desejados utilizou-se uma metodologia de quatro etapas: Na primeira etapa buscou-se entender os mecanismos de falhas atuantes no trocador por meio da Análise da Árvore de Falhas (AAF) ou “*Fault Tree Analysis*” (FTA). Segundo Birolini (2007) esta técnica é representada por uma avaliação de cima para abaixo (do topo para abaixo) que consiste em identificar o problema ou falha até chegar à causa raiz representada em um diagrama por *and* (e), *or* (ou) e *not* (não) das combinações de causas no menor nível. Segundo Augusto (2014), com uma FTA pode-se fazer tanto uma análise qualitativa da ordem “*top-down*” quanto quantitativa caso seja necessário. A segunda etapa consistiu em avaliar os dados de vida do trocador, ou seja, o histórico de intervenções de manutenção que ocorreram ao longo da vida deste equipamento, esses dados foram levantados do prontuário de manutenção e inspeção do equipamento arquivado no setor de inspeção de equipamentos e foram analisados por meio de um modelo estocástico de Weibull, que representa adequadamente os processos de desgaste característicos do equipamento analisado neste trabalho (PALLEROSI, 2006). Com estes dados foram também obtidas as métricas de confiabilidade¹, utilizando o *software* Weibull++. Na terceira etapa foi encontrada a confiabilidade do equipamento para um determinado período por meio de um processo de simulação utilizando diagramas de bloco de confiabilidade (DBC ou “*Reliability Block Diagram – RBD*”) no “*software*” Blocksim.

E, por fim a quarta etapa consistiu na aplicação do Modelo Crow-AMSAA (PNHP) aos tempos de falha do trocador em sua configuração original, com tubos de aço inox, para

verificar se a política de manutenção aplicada ao equipamento estava adequada para garantir o maior tempo de operação sem falhas.¹

2 Trocadores de calor

Trocador de calor é um vaso de pressão destinado a transferir calor entre dois fluídos sem que eles se misturem. Segundo a Norma Regulamentadora 13 de Caldeiras, Vasos de pressão e Tubulações (NR-13) item 13.5.1.1 denomina-se “vasos de pressão equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, diferente da atmosférica” (NR-13, 2014). Os trocadores de calor podem ser denominados como aquecedores, resfriadores, vaporizadores, condensadores, entre outros. As normas mais utilizadas nos projetos de trocadores são as normas da Associação dos Fabricantes de Trocadores Tubulares (TEMA) e as regras para construção de vasos de pressão seção VIII da Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos (“*American Society of Mechanical Engineers*” ASME).

Segundo Telles (2007) “nos trocadores de calor convencionais, temos dois fluídos circulando por dois circuitos independentes: o fluído quente e o fluído frio. O fluído que passa por dentro dos tubos do feixe tubular: é o denominado ‘fluxo pelos tubos’ e o outro que passa por fora do feixe tubular denomina-se ‘fluído pelo casco’. Estes dois circuitos são usualmente designados como ‘lado dos tubos’ (“*tube side*”) e ‘lado casco’ (“*shell side*”) respectivamente. Cada um desses circuitos pode ser feito em uma só passagem ou em várias passagens sucessivas”.

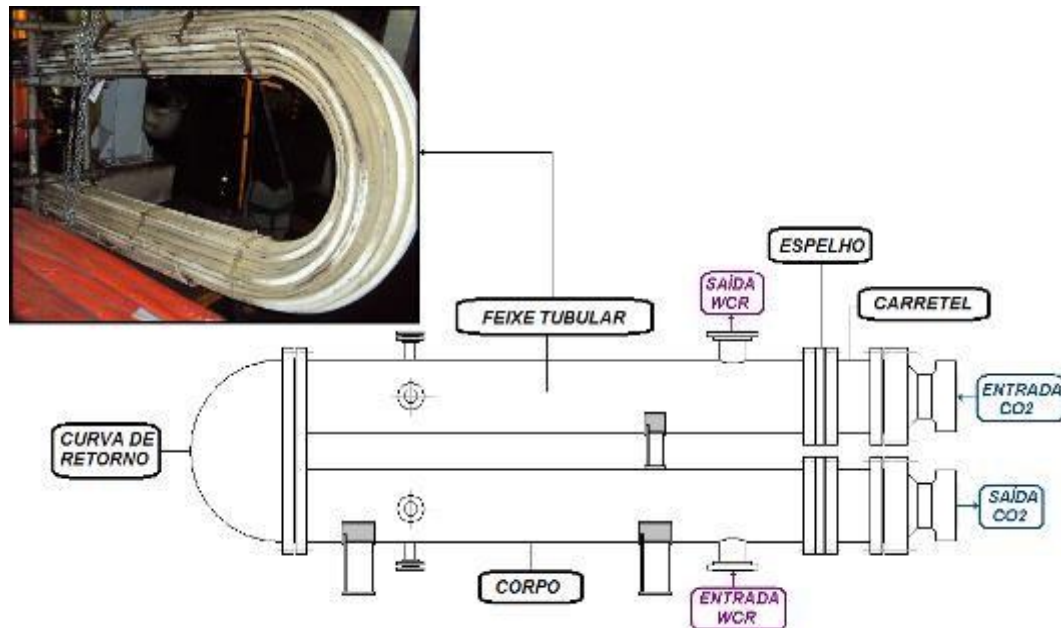
Segundo Telles (2007) os trocadores de calor convencionais têm três partes principais, cada uma composta de várias peças que são denominadas:

- i. Corpo (“*shell*”) é o casco onde circula o fluído externo;
- ii. Carretel (“*Channel*”) é uma câmara presa ao casco, onde se abrem as extremidades dos tubos do feixe tubular, e que serve para distribuição de fluído que circula nos tubos;
- iii. Feixe tubular (“*bundle*”) é o conjunto formado pelos tubos de troca de calor e pelos espelhos (ou espelho), que são placas planas espessas, com perfurações onde se encaixam e se prendem as extremidades dos tubos.

A figura 1 a seguir apresenta o desenho do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO₂ tipo convencional bi-tubular com feixe tubular em U (“*U tube bundle*”) que possui dois cascos acoplados pelos carretéis de entrada e saída e com a curva de retorno. Com destaque para a foto ¹do feixe tubular fora do interior do trocador.

¹ Métricas de confiabilidade: função densidade de probabilidade de falhas, função de probabilidade acumulada de falhas, função confiabilidade e função taxa de falhas

Figura 1 Trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO₂



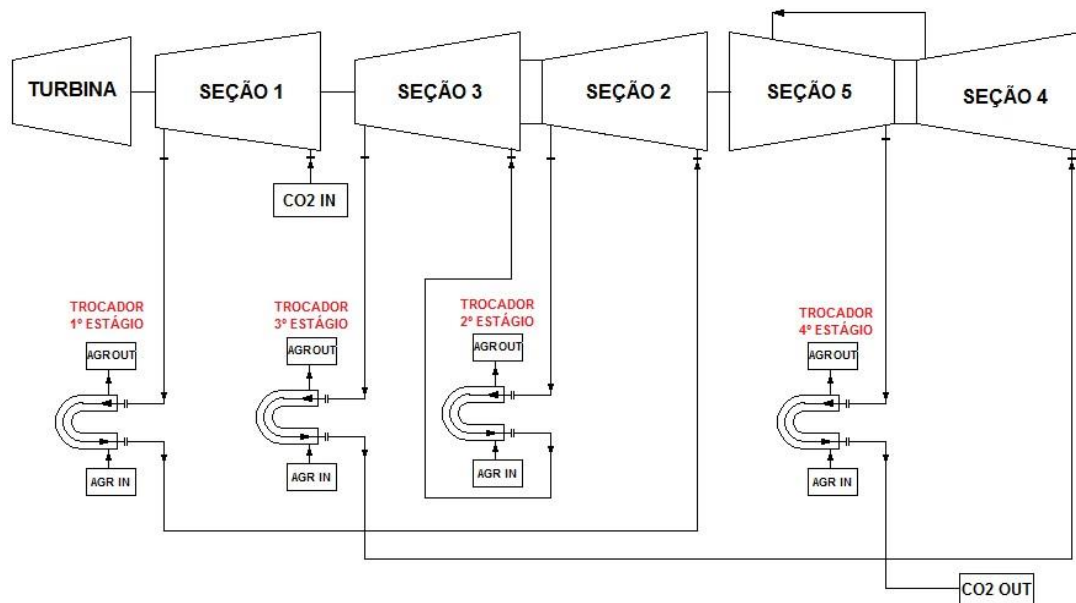
Fonte: Autor
(2014).

2.1 Descrição do sistema

O equipamento em estudo pertence ao sistema do compressor de CO₂, o qual é composto por quatro estágios totalmente interligados. Cada estágio é submetido a um nível crescente de pressão, da esquerda para direita, ou seja, do trocador com menor número de ordem para o de maior número de ordem e, conseqüentemente quanto maior o número de ordem do trocador maior será a exigência pressão que ele sofre. Assim o trocador do 4º estágio se torna o componente crítico do sistema cuja falha determina, necessariamente, a parada do processo produtivo. O tempo de parada, manutenção e retorno da operação leva em torno de três dias ao custo de lucro cessante de R\$ 2milhões/dia baseado nos valores de R\$ 1.000,00/tonelada de ureia e na produção diária de 1975 toneladas por dia.

A figura 2 apresenta o fluxograma resumido do processo no qual o trocador está inserido. Importante ressaltar que os outros três trocadores que fazem parte do sistema do compressor não apresentam histórico de falhas significativo por serem submetidos a níveis de pressão muito inferiores aos do estágio 4, portanto, não foram considerados como parte do estudo.

Figura 2 Fluxograma de processo do compressor de CO₂.



Fonte: Autor
(2014).

Este equipamento apresenta histórico de falhas significativo que gerou grandes perdas de produção em mais de 30 anos de operação, portanto objetivo é apresentar um estudo de confiabilidade por meio de análise de dados de vida do componente crítico, trocador de 4º estágio, que suportará a tomada de decisão para escolha de um prazo adequado para manutenção preventiva.

3 Engenharia da Confiabilidade

Nesta seção são demonstrados e definidos os principais conceitos empregados pela engenharia da confiabilidade aplicados neste trabalho.

Segundo Birolini (2007) confiabilidade é uma característica de projeto, expressada pela probabilidade de um sistema/componente realizar sua função, sob dadas condições para um intervalo de tempo determinado. É geralmente designada por R do inglês *reliability*.

Do ponto de vista qualitativo, a confiabilidade pode ser definida como a capacidade do sistema/componente permanecer funcional. Quantitativamente, confiabilidade é a probabilidade de se operar normalmente sem ocorrer interrupções durante um determinado

intervalo de tempo. Isso não significa que componentes/partes redundantes não podem falhar, tais componentes podem falhar e serem reparados (sem perda da função) (BIROLINI, 2007).

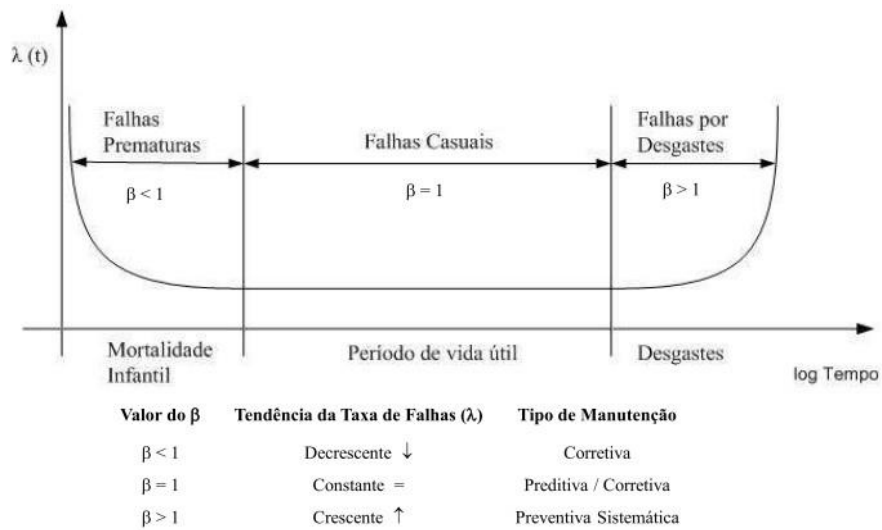
3.1 Análise do ciclo de vida de um sistema

A tarefa principal da Análise de Dados de Vida (ADV) é adaptar os dados de falha de um subsistema ou componente a um modelo probabilístico conhecido que corresponda ou se ajuste melhor ao fenômeno observado. Tal ajuste proporciona a identificação das funções densidade de probabilidade de falhas, probabilidade acumulada de falhas, confiabilidade, e taxa de falhas dos sistemas todas elas são oriundas da análise da periodicidade e frequências das falhas.

Segundo Lافraia (2001) “a taxa de falhas ou curva da banheira apresenta, de maneira geral, as fases da vida de um componente. Embora ela seja apresentada como genérica, a curva da banheira só é válida para componentes individuais”. Apresentada na figura 3 a curva da taxa de falhas demonstra marcadamente três períodos de vida característicos, a saber: mortalidade infantil ($\beta < 1$), período de vida útil ($\beta = 1$) e período de envelhecimento ou desgaste ($\beta > 1$). Onde β (beta) é o parâmetro de forma da função densidade de probabilidades de Weibull que será calculado baseado no histórico de falhas do feixe do trocador de calor em estudo.

Cada período tem sua característica peculiar, na mortalidade infantil ocorrem falhas prematuras com taxa de falha decrescente oriundas dos processos de fabricação deficientes, erros de projeto, instalação inadequada, entre outros. O período de vida útil possui taxa de falha constante, período de falhas aleatórias, ao longo do ciclo de operação cabendo à manutenção prever tarefas de mitigação de falhas imprevistas causadas por fatores exógenos que ocorrem por interferência indevida tensão/resistência, fator de segurança insuficiente, erros humanos durante uso, falhas não detectáveis durante a manutenção preventiva, entre outros. Ao término da vida útil inicia-se o período de falhas por desgaste devido a fadiga dos materiais, fluência, corrosão, manutenção insuficiente ou deficiente, entre outros. (LAFRAIA, 2001).

Figura 3 Curva da Taxa de Falha ou Curva da Banheira $\lambda(t) = f(t)/R(t)$ vale para qualquer distribuição



Fonte: Lafraia (2001, adaptado)

3.2 Métricas ou medidas de confiabilidade e risco

A partir dos dados de falha previamente tabulados pode-se representá-los de forma gráfica, onde no eixo “y” traça-se a frequência observada das falhas, em colunas (retângulos), divididos em classes uniformes no eixo “x”. De maneira que a base de cada retângulo representa a quantidade ou frequência com que o valor dessa classe ocorreu no conjunto de dados. Assim a partir deste gráfico ou histograma se determinam as medidas ou métricas da confiabilidade a saber: obtém-se, a partir da curva envoltória da frequência relativa simples observada, a função densidade de probabilidade de falhas - $f(t)$ - conhecida como pdf sigla do inglês “*Probability Density Function*”; a partir da curva envoltória da frequência relativa acumulada observada obtém-se a função de probabilidade de falhas ou de não sobrevivência - $F(t)$ - e seu complemento chamada função de sobrevivência - $R(t)$ - ou função de confiabilidade.

A função densidade de falhas (pdf) representa a variação de probabilidade de falhas por unidade de tempo. É representada graficamente por uma função, distribuição de probabilidade e expressa pela equação 1 (LAFRAIA, 2001).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

$F(t)$ é a função acumulada de falhas que representa a probabilidade de falhas entre um período t_1 e t_2 . É representada graficamente por uma função de distribuição de densidade acumulada e expressa pela equação 2 a seguir. (LAFRAIA, 2001).

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t).dt \quad (2)$$

Em confiabilidade, estamos preocupados com a probabilidade de que um item sobreviva a um dado intervalo de estabelecido (de tempo, ciclos, distância). Isto é, não haverá falhas no intervalo de 0 a x_t , sendo a confiabilidade dada pela função $C(t)$ definida pela equação 3 a seguir. (LAFRAIA, 2001).

$$C(t) = \int_t^{\infty} f(t).dt = 1 - \int_0^t f(t).dt = 1 - F(t) \quad (3)$$

Logo $F(t)$ é a probabilidade de falha do sistema, conforme representado pela equação 4:

$$F(t) = 1 - C(t) \quad (4)$$

A taxa condicional de falha é a probabilidade condicional de falha no intervalo de t a $t+dt$, dado que não houve falha em t . Esta função também é conhecida como função de risco (“*hazard function*” ou “*hazard rate*”) e é representada pela equação 5. (LAFRAIA, 2001).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

3.3 Definições ligadas à confiabilidade

Tempo médio para a falha (TMPPF) é o tempo médio para falhar de componentes que não podem ser reparados e é aplicável a componentes cuja vida termina na primeira falha. Já o tempo médio entre falhas (TMEF) é utilizado a componentes reparáveis. Já tempo médio para reparo (TMPPR) é o tempo para reparo de componentes obtido de uma amostra da mesma condição de uso do componente desejado. (LAFRAIA, 2001)

Disponibilidade (D) é a capacidade do componente mediante manutenção apropriada exerça sua função satisfatoriamente para um dado intervalo de tempo (t). Na prática, é expressa pelo percentual de tempo em que o sistema encontra-se operante, para componentes que operam continuamente e para componentes reservas, é a probabilidade de sucesso na operação do sistema quando demandado. É ideal para descrever equipamentos em plantas de processo. (LAFRAIA, 2001).

3.4 Características da distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é geralmente usada para representar os modos de falha de sistemas eminentemente mecânicos caracterizados por taxas de falha crescentes. (NIKOLAIDIS, GHIOCEL, SINGHAL, 2005).

O engenheiro e matemático sueco Ernst Hjalmar Waloddi Weibull fez uma contribuição substancial para confiabilidade de sistemas mecânicos por meio do desenvolvimento da estatística. Foi o primeiro a modelar uma falha física em um modelo matemático. O modelo de Weibull contém o conceito de fratura frágil que afirma que qualquer falha ou defeito de tamanho crítico faz toda a estrutura falhar e que pode ser derivada dos dados estatísticos de falhas do ponto mais fraco dentro de um sistema. (NIKOLAIDIS, GHIOCEL, SINGHAL, 2005).

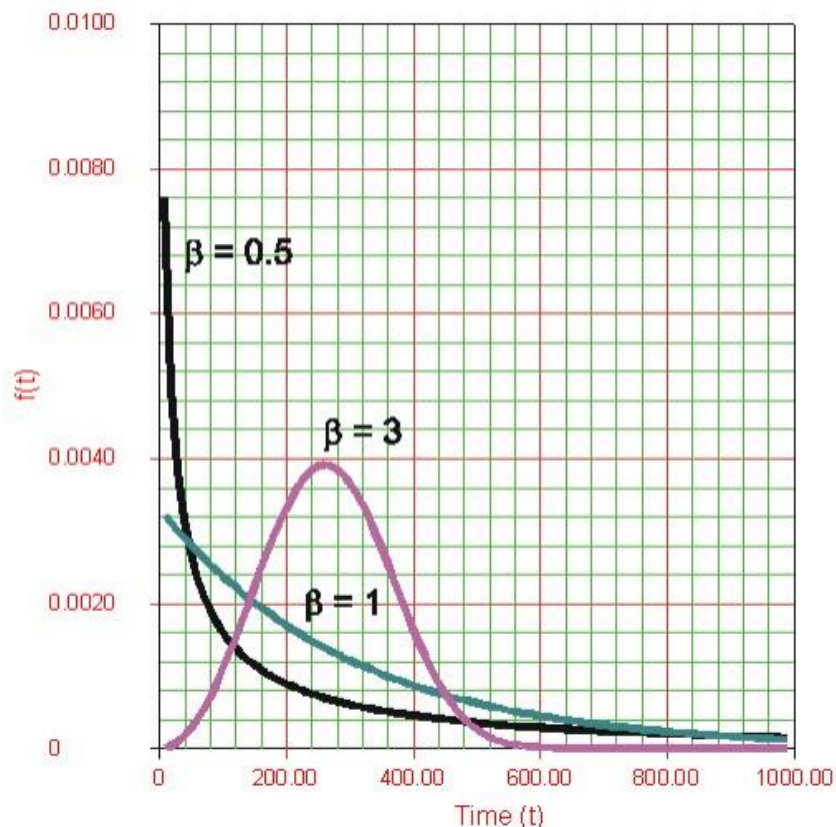
A distribuição Weibull é extensivamente usada em análise de confiabilidade e de dados de vida devido a sua versatilidade. Dependendo dos valores dos parâmetros, a distribuição Weibull pode ser usada para modelar uma variedade de comportamentos que envolva vida. Um aspecto importante da distribuição Weibull é como os valores do parâmetro de forma (β) e de vida característica (η) afetam a características da distribuição, como a forma da curva da pdf, da confiabilidade e da taxa de falhas. (RELIABILITY HOT WIRE, 2005).

Nos estudos de engenharia de confiabilidade, o parâmetro de posição (γ) caracteriza a vida inicial do item sendo, na maioria das aplicações, desprezado, $\gamma=0$. (SIMONETTI, SOUZA, SILVEIRA, ARRUDA, 2014).

As distribuições Weibull com o $\beta < 1$ têm uma taxa de falha que diminui com tempo, conhecida também como falha infantil ou prematura, as distribuições de Weibull com o β próximo de ou igual a 1 têm uma taxa de falha razoavelmente constante, indicando a vida útil ou de falhas aleatórias e as distribuições de Weibull com o $\beta > 1$ têm uma taxa de falhas que aumenta com o tempo, conhecido também como falhas de desgaste. Estes betas abrangem as três fases da "clássica curva da banheira". A distribuição Weibull mista com uma subpopulação com o $\beta < 1$, uma subpopulação com o $\beta = 1$ e outra com o $\beta > 1$, teria um gráfico de taxa de falhas que fosse idêntico à curva da banheira. (RELIABILITY HOT WIRE, 2005).

A figura 04 a seguir apresenta as curvas de pdf para $\beta < 1$, $\beta = 1$ e $\beta > 1$.

Figura 4 Curva Weibull pdf com $\beta < 1$, $\beta = 1$ e $\beta > 1$

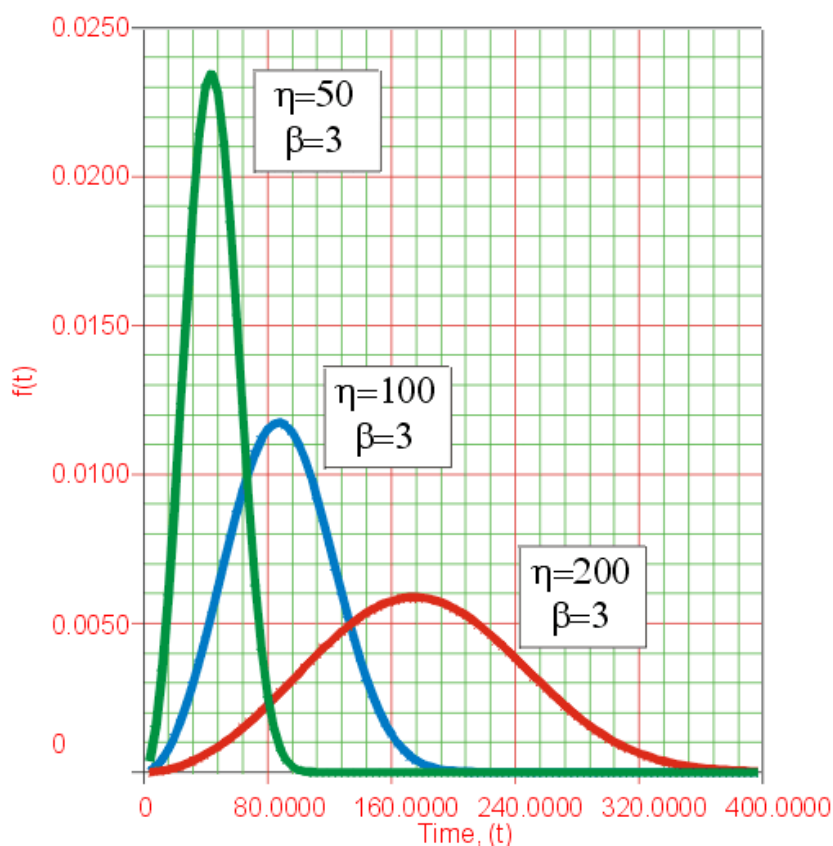


Fonte: Reliability hot wire (2005, adaptado)

Uma variação no parâmetro η , tem o mesmo efeito na distribuição que uma mudança de escala na abscissa. Aumentar o valor de η , mantendo constante o β tem o efeito de esticar para fora da pdf. Desde que a área sob uma curva da pdf é um valor constante de um, o "pico"

da curva da pdf diminuirá também com o aumento de η . Se η é aumentado, enquanto β e γ são mantidos constantes, a distribuição, ou seja, a "curva" começa a se estender, esticar para direita e sua altura diminui, ao manter sua forma e posição. Se η é diminuído, enquanto β e γ são mantidos constantes, a distribuição começa se estreitar para dentro, para esquerda (isto é para sua origem: 0 ou γ), e aumenta sua altura. O η tem a mesma unidade que T (variável de tempo), tal como horas, milhas, ciclos, atuações, entre outras. (RELIABILITY HOT WIRE, 2005).

Figura 5 Curva Weibull pdf variando valores de η



Fonte: Reliability hot wire (2005, p6, adaptado)

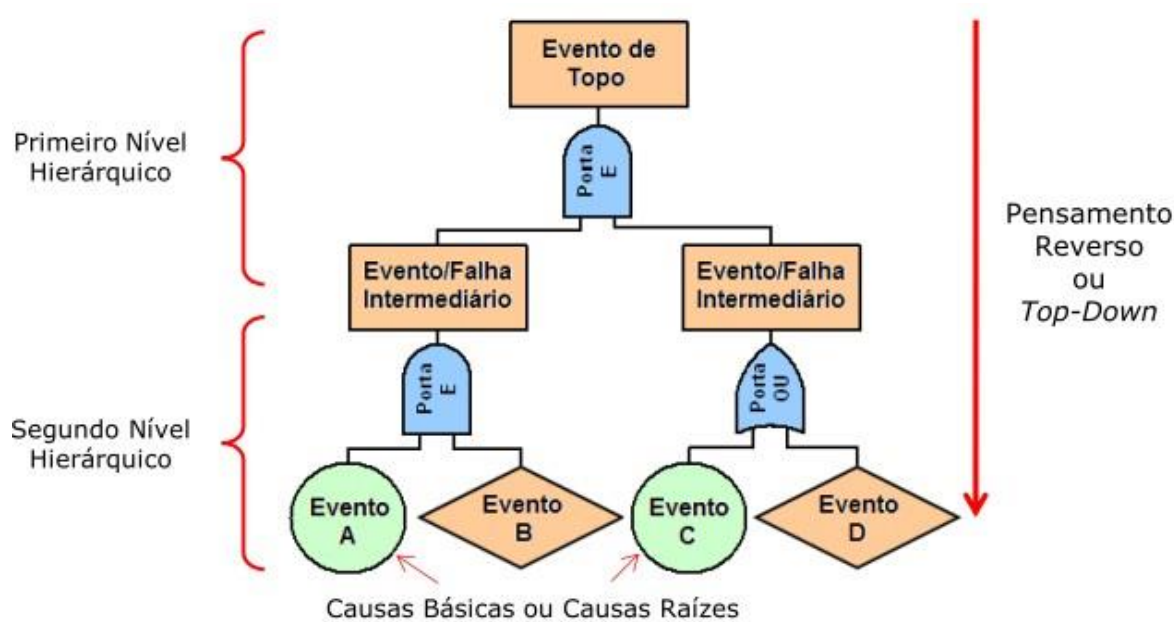
A figura 5 ilustra as curvas quando β e γ são mantidos constantes e apenas η variando os valores.

3.5 Árvore de falhas (FTA)

A técnica de análise da árvore de falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*) é uma técnica dedutiva (de pensamento reverso), ou seja, a partir de um evento inicial, o qual se quer analisar (chamado de evento topo), identificam-se os eventos intermediários resultantes da associação lógica das causas básicas ou raízes, que geraram o evento de topo. Estimativas de

probabilidade podem ser aplicadas a cada evento na árvore e estas são combinadas logicamente usando portas lógicas "and" (e) e "or" (ou) para definir a probabilidade do evento topo. FTA é muito utilizada de maneira qualitativa, na medida em que os elementos da árvore e estruturas estão identificados. (NIKOLAIDIS, GHIOCEL, SINGHAL, 2005). Segundo Scapin (2007, p.70), o evento de saída conectado pela porta "and" ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrer simultaneamente. Em sentido oposto, o evento de saída conectado pela porta "or" ocorre se qualquer um dos eventos de entrada ocorrer. Uma porta lógica pode ter um ou mais eventos de entrada, mas somente um evento de saída.

Figura 6 Diagrama lógico FTA



Fonte: Rigoni (2014, adaptado)

A figura 6 apresenta um exemplo de FTA "top-down".

4 Histórico de falhas e metodologia FTA/ADV

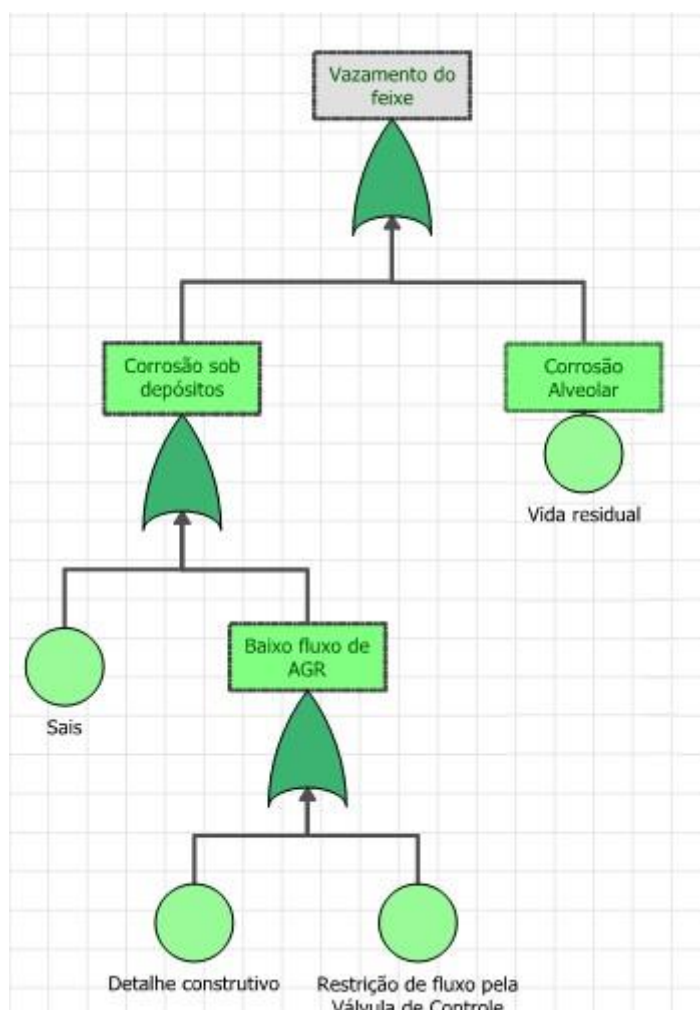
Este item apresenta a análise de falha do trocador por meio de FTA e análise dos dados de vida, elaborados com auxílio dos softwares Weibull++ e Blocksim² apresentando os resultados encontrados.

4.1 FTA do trocador de calor do quarto estágio do compressor de CO₂

² BlockSim e Weibull²⁺⁺ são marcas da Relisoft Corporation USA

Antes de propor qualquer solução de manutenção ou melhoria no projeto de um determinado equipamento é necessário entender as razões pelas quais ele falha. Para isso, foi produzida uma análise de causas das falhas representada por uma FTA (figura 7) qualitativa realizada no trocador do 4º estágio do compressor de CO₂ elaborada com ajuda do *software* Blocksim.

Figura 7 FTA trocador do quarto estágio do compressor de CO₂



Fonte: próprio autor
(2014)

O quadro 1 a seguir apresenta o resultado da FTA explanando as causas expostas na figura 7.

Quadro 1 Resultado da FTA do trocador do quarto estágio do compressor de CO₂

ANÁLISE DAS CAUSAS RAÍZES			
CAUSAS	PROVÁVEL		POR QUE ?
	SIM	NÃO	
Corrosão sob depósitos por sais	X		Em trocadores de calor que operam com AGR no lado casco existe a tendência de ocorrer depósitos localizados principalmente nas regiões das chicanas. Esses depósitos aceleram o processo corrosivo devido à falta de oxigênio (passivação) localizada.
Corrosão sob depósitos por baixo fluxo de AGR	X		Devido ao detalhe construtivo do espelho na região de saída de AGR do casco ocorre um grande acúmulo de depósitos em razão do baixo fluxo de AGR, provocando aumento na deposição de sais e consequentemente acelerando o processo de corrosão.
			Devido à restrição da válvula de controle na entrada do trocador ocorre baixo fluxo de AGR e potencializa a deposição de sais principalmente na região de saída do espelho.
Corrosão Alveolar	X		AGR por si só é um meio corrosivo devido aos sais dissolvidos (cloretos, carbonatos e bicarbonatos) presentes e por essa razão ocorre à formação de alvéolos nos tubos e o desgaste natural do componente. E é potencializada pela ação de contaminantes (CO ₂), pH, temperatura, velocidade e ação mecânica.

Fonte: GENTIL (adaptado pelo próprio autor, 2014)

A figura 8, mostra em detalhe a falha de um tubo do feixe e sua localização. Observe que o local onde ocorreu a falha está localizado próximo ao espelho, região onde se acumula os depósitos de fosfato de cálcio.

Figura 8 Falha de um tubo do trocador do quarto estágio do compressor de CO₂ devido à corrosão sob depósitos



Fonte: Autoria Própria
(2013)

Este acúmulo de depósito somente ocorreu devido a um longo tempo de operação o qual o trocador foi submetido sem sofrer manutenção e limpeza do feixe tubular.

4.2 ADV do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO₂

Desde o início de sua operação em 1982 o trocador apresentou diversas falhas e foi submetido a várias intervenções de manutenção, gerando perdas significativas. Segundo a NR-13 este equipamento deve ser aberto para inspeção a cada 12 anos por ser categoria IV e a empresa ser certificada pelo SPIE (Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos), entretanto nunca foi atingido este prazo limite, determinado pela norma, pois antes disso ocorriam falhas que forçavam a parada do equipamento para realizar o(s) tamponamento(s) do(s) tubo(s) ou até mesmo a substituição completa do feixe tubular.

Ocorreram diversas falhas no início da operação até se descobrir que o material do feixe tubular era o problema. Somente a partir de 1984 o feixe original construído em aço inoxidável foi substituído por outro de aço carbono. Tal medida se mostrou acertada e o equipamento passou a operar com maior disponibilidade, porém outros mecanismos de

deterioração passaram atuar. Constatou-se que após a mudança do material de construção do feixe tubular não houve um plano de manutenção com prazos adequados para as intervenções preventivas. Tais intervenções sempre foram embasadas no resultado da última intervenção e inspeção, ou seja, um critério que por várias vezes se mostrou inadequado ou insuficiente para mitigar falhas imprevistas durante a campanha³.

Baseado no histórico destas falhas foi realizado o estudo de confiabilidade baseado na comparação, entre os modelos de falha, do sistema original com tubos de aços inoxidáveis e do sistema atualizado com tubos de aço carbono, acrescida de uma análise simulacional do sistema modificado que será apresentado na sequência. A tabela 1 apresenta os dados de falhas (vazamento) e intervenções preventivas (limpeza do feixe) realizadas no trocador de calor para o feixe de aço carbono, após a substituição do feixe tubular de aço inoxidável por ele em 15/05/1984, e avalia um período dos últimos 30 anos e quatro feixes. Atualmente está em operação o quinto feixe de aço carbono. Os dados de falha mostrados na tabela 1 foram considerados desde o início de operação de cada feixe até sua primeira falha. Esses dados foram coletados no prontuário de inspeção do equipamento no setor de inspeção de equipamentos.

Tabela 1 Histórico de intervenções do trocador do quarto estágio do compressor de CO2

Feixe	Campanha	Data	Intervenção	Tempo até Falha (dias)	Condição do feixe
1°	0	15/05/1984	Preventiva	0	Novo
1°	1	29/08/1985	Preventiva	471	Usado
1°	2	15/05/1987	Preventiva	624	Usado
1°	3	28/06/1988	Preventiva	410	Usado
1°	4	02/03/1990	Preventiva	612	Usado
1°	5	11/09/1990	Preventiva	193	Usado
1°	6	19/04/1991	Preventiva	220	Usado
1°	7	19/02/1992	Final de vida	306 (2836)	Substituído (novo)
2°	8	15/04/1993	Preventiva	421	Usado
2°	9	15/05/1994	Preventiva	395	Usado
2°	10	19/08/1997	Preventiva	1192	Usado
2°	11	14/09/1998	Vazamento detectado	391 (2399)	Usado
2°	12	04/12/1998	Vazamento detectado	81	Substituído (novo)

³ Entende-se por campanha o tempo de que o equipamento operou continuamente até sofrer algum tipo de intervenção preventiva ou corretiva.

3°	13	28/06/2000	Preventiva	572	Usado
3°	14	04/06/2001	Preventiva	341	Usado
3°	15	20/02/2003	Vazamento detectado	626 (1539)	Usado
3°	16	29/10/2003	Preventiva	251	Substituído (novo)
4°	17	12/06/2005	Vazamento detectado	592 (592)	Usado
4°	18	22/02/2008	Preventiva	985	Usado
4°	19	24/04/2013	Vazamento detectado	1888	Usado
4°	20	24/10/2013	Preventiva	183	Substituído (novo)

Fonte: Prontuário NR-13 do trocador

Legenda:

Usado – este termo foi utilizado para representar que uma inspeção foi realizada determinando somente uma operação de limpeza no trocador sem substituição do feixe do trocador.

Substituído - este termo foi utilizado para representar que uma inspeção foi realizada determinando a substituição do feixe do trocador.

Com os dados da tabela 1 foi possível determinar as métricas de confiabilidade já definidas anteriormente. Os gráficos 1 a 4 apresentam as curvas do novo trocador de aço carbono: o gráfico 1 apresenta a pdf, o gráfico 2 a curva da probabilidade acumulada de falha $F(t)$, o gráfico 3 a confiabilidade $C(t)$ e, o gráfico 4 a taxa de falha $[f(t)/C(t)]$, que se apresenta de forma crescente, ou seja, com o passar do tempo a confiabilidade diminui e conseqüentemente a probabilidade de falha aumenta. As simulações foram realizadas com auxílio do *software* Weibull++ o melhor modelo foi à distribuição de Weibull de 2 parâmetros (β e η), utilizando a inferência pelo método da máxima verossimilhança (MLE).

Gráfico 2 Curva pdf do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO2



Gráfico 1 Curva F(t) do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO2



Gráfico 3 Curva C(t) do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO2



Gráfico 4 Taxa de Falha do trocador de calor do 4º estágio do compressor de CO2

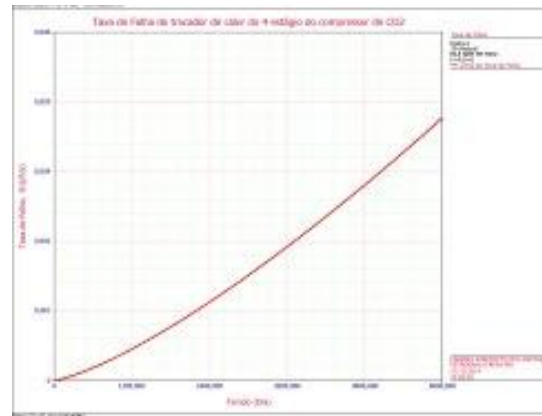
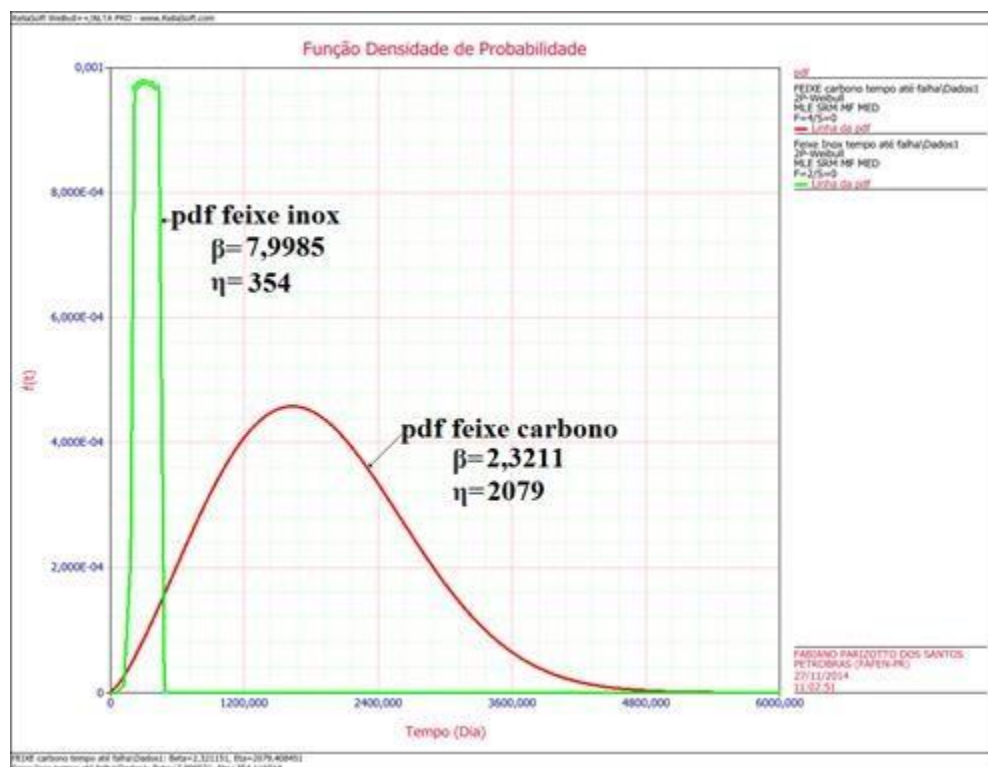


Tabela 2 Histórico de intervenções do trocador do quarto estágio do compressor de CO2 (aço inoxidável – sistema original)

Feixe	Campanha	Data	Intervenção	Tempo até Falha (dias)	Condição do feixe
1º	0	20/03/1982	Início de operação	0	Novo
1º	1	06/04/1983	Vazamento detectado	382 (382)	Usado
1º	2	10/05/1983	Vazamento detectado	34	Usado
1º	3	17/05/1983	Vazamento detectado	7	Substituído (novo)
2º	4	24/02/1984	Vazamento detectado	283 (283)	Usado
2º	5	15/05/1984	Vazamento detectado	81	Usado

Fonte: Prontuário NR-13 do trocador

Gráfico 5 Comparativo da pdf do feixe em aço inoxidável versus feixe em aço carbono



Fonte: próprio autor
(2014)

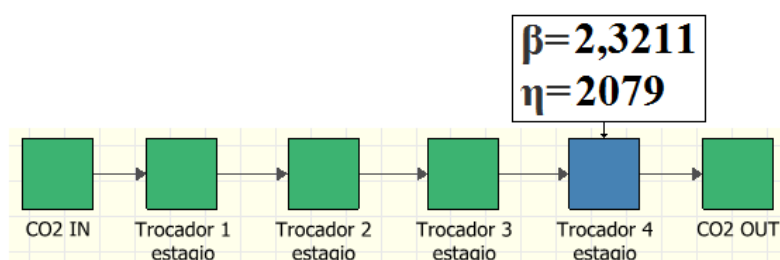
Como pode ser observado no gráfico 5 o resultado comprova que a troca de material do feixe foi acertada dado que a *pdf* do sistema modificado com os tubos de aço carbono demonstra um número menor de falhas no início de operação do sistema e um aumento da vida característica para 2079 dias contra 354 dias do original. Do outro lado o sistema original apresentava uma alta concentração de falhas no princípio do ciclo de operação característico de um padrão de ocorrência de falhas prematuras ou período de mortalidade infantil.

5 Análise da confiabilidade do sistema - processo simulacional

Por meio dos *softwares* BlockSim e Weibull++, foram realizadas simulações do sistema utilizando-se os Diagramas de Bloco de Confiabilidade (DBC), conforme mostrado na figura 9, para um período máximo de 1460 dias (4 anos). Com o propósito de se determinar a confiabilidade e probabilidade de falha do trocador, para outros tempos, foram realizadas simulações e os resultados foram sumarizados na tabela 3.

Os demais trocadores do sistema (dos outros estágios) não apresentam falhas, desta maneira foram considerados como “blocos que não falham”, ou seja, os outros trocadores do sistema nunca apresentaram falha desde seu início de operação.

Figura 9 RBD do trocador do 4º estágio do compressor de CO2



Fonte: Autor
(2014)

Os tempos calculados na tabela 3 comprovam que quanto maior os intervalos entre manutenções menor a confiabilidade e consequentemente maior a probabilidade de falha.

O intervalo entre manutenções considerado fatível foi o de 512 dias no qual a confiabilidade é de $C(t)=0,96$, enquanto que para o intervalo entre manutenções programadas da fábrica de 730 dias a confiabilidade é de $C(t)=0,91$, tem-se um decréscimo 5% na confiabilidade em relação ao intervalo ideal proposto. Tabela 3 – $C(t)$ e $F(t)$ do trocador do 4º estágio do compressor de CO₂. Certamente a escolha ótima seria de 365 dias, mas que ficaria muito longe dos 730 dias que representam a parada da planta para o processo de manutenção programada.

Tabela 3 $C(t)$ e $F(t)$ obtidas pelo processo simulacional

Dias	Confiabilidade $C(t)$	Probabilidade de Falha $F(t)$
1460	0,6440	0,3559
1095	0,7980	0,2020
730	0,9157	0,0842
512	0,9620	0,0379
365	0,9825	0,0174

Fonte: BlockSim -
Reliasoft

5.1 Análise dos custos de manutenção

Os custos de manutenção podem ser analisados considerando dois cenários, de manutenção preventiva programada a cada dois anos e manutenção corretiva devido à falha do trocador.

O custo de manutenção preventiva é de R\$ 11.000,00 quando executado durante a parada programada da unidade, já o custo de manutenção corretiva é mais elevado chegando ao valor de R\$ 30.000,00, pois existem outros custos não contemplados na programação dessa atividade como, por exemplo, custo de deslocamento de equipe e às vezes a necessidade de contratação de emergência que faz o custo se elevar.

Baseado nos parâmetros do modelo encontrados, na ADV, de $\beta=2,3211$ e $\eta=2079$ e nos valores de manutenção preventiva e corretiva é possível avaliar se existe um tempo ótimo para substituição do feixe, entretanto esse cálculo só é válido quando o $\beta>1$. Os cálculos são apresentados pelas seguintes equações:

5.1.1 – Desvio padrão:

$$\sigma = \eta \cdot \sqrt{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]}$$

$$\sigma = 2079 \cdot \sqrt{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{2,3211}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{2,3211}\right) \right]} \Rightarrow \sigma = 853,34 \quad (6)$$

5.1.2 Tempo médio:

$$\mu = T_{\text{Médio}} = t_0 + \left[\eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$$

$$\mu = T_{\text{Médio}} = 0 + \left[2079 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{2,3211}\right) \right] \Rightarrow \mu = 1841,71 \quad (7)$$

5.1.3 Custo de manutenção preventiva / corretiva:

$$\frac{C_{\text{preventiva}}}{C_{\text{corretiva}}} < \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{(\sigma)^2}{(\mu)^2} \right)$$

$$\frac{11000}{30000} < \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{(853,34)^2}{(1841,71)^2} \right) \Rightarrow 0,36 < 0,39$$

5.1.4 Determinação do tempo ótimo de substituição:

$$T_{\text{ótimo}} = t_0 \left[\eta * \left(\frac{C_{\text{preventiva}}}{C_{\text{corretiva}}} * \frac{1}{(\beta-1)} \right)^{1/\beta} \right]$$

$$T_{\text{ótimo}} = 1.844,5 \text{ dias ou } 5 \text{ anos}$$

(9)

Como a relação entre os Custos da manutenção preventiva e corretiva foi menor que o valor do cálculo obtido pela equação (8) do lado direito da desigualdade conclui-se que poderá haver um tempo ótimo de substituição do feixe de 5 anos. Em outras palavras isto significa que se a operação dos feixes for superior a 5 anos os custos de corretiva seriam maiores que os das preventivas e conseqüentemente haveria uma quantidade muito grande de corretivas mais onerosas à gestão da manutenção. Porém, como será evidenciada no item 6 a política de manutenção adotada atualmente está contribuindo pelo aumento do TMEF e conseqüentemente necessita ser revisada.

6 Quarta etapa - Aplicação do Modelo Crow-AMSAA (PNHP)

Ao se conduzir uma análise de dados de vida ou da distribuição de falhas de um sistema ou componente, deve-se considerar que as falhas observadas são estatisticamente independentes e identicamente distribuídas para generalizar o comportamento futuro do sistema. Isso implica que para uma sequência de ocorrência de falhas serem consideradas independentes e identicamente distribuída cada uma delas deve possuir a mesma distribuição de probabilidade e serem mutuamente independentes. Ser mutuamente independente implica que o conhecimento da ocorrência de uma falha não garante a ocorrência de outra, estatisticamente falando a ocorrência de uma não afeta a probabilidade de ocorrência de outra.

Assim, para se aplicar um modelo de distribuição de falhas, encontrado a partir de um conjunto de falhas observadas, a um sistema reparável obrigatoriamente, depois da ocorrência de uma falha, deve-se considerá-lo **tão bom quanto novo**. Ou seja, que todo o processo ocasionado pela falha, que deixou o sistema inoperante, até a ação da manutenção e o devido

reparo, não altera a condição inicial do sistema. É como se pudéssemos substituir todo o sistema antigo por um totalmente novo após a falha e, que o padrão de repetição dessa falha é o mesmo para as futuras falhas do sistema. Como isso não é possível, por este motivo não se deve aplicar um modelo de distribuição de falhas a um sistema reparável, pois este não retratará o processo *falha-repara* natural deste tipo de sistema.

Dado então que um sistema reparável pode ser analisado por meio de seu processo *falha-repara* não se pode mais considerar que, após a falhas, ele assume a condição de “tão bom quanto novo” mas sim a condição de “tão ruim quanto velho do inglês *“as-bad-as-old”*”. Logo, um sistema reparável pode ser traduzido como uma sequência de eventos aleatórios interdependentes e, que o tempo até a próxima falha, depois da atividade de manutenção, depende de quão boa ou ruim foi tal atividade.

Devido a esta característica os eventos de um sistema reparável são dependentes e não identicamente distribuídos logo à análise de dados de vida não poderá ser utilizada, pois requer que os eventos sejam independentes e identicamente distribuídos.

Um sistema reparável então pode ser modelado com um processo estocástico. “A natureza estocástica de um processo é devida ao fato de que ao chegar a um estado, permanecerá nele até a próxima ocorrência de um evento.” Porém, tais eventos são dependentes e não identicamente distribuídos.

Dentre os vários modelos de processos estocásticos aplicáveis ao caso destaca-se o de Poisson é um dos mais simples e mais importantes dentre os processos estocásticos. Isto não se deve apenas às inúmeras aplicações desse processo, mas, também à utilidade na construção de processos mais complexos. Uma característica desse processo é que os intervalos de tempo entre eventos sucessivos têm distribuição exponencial. Esta distribuição é particularmente conveniente na modelagem matemática porque implica em uma taxa fixa de ocorrência. E, como a taxa de ocorrência de uma falha em um sistema reparável não deve ser considerada constante emprega-se o Processo Não Homogêneo de Poisson (PNHP).

O modelo Crow-AMSAA é um PNHP. Esta visão considera que o Modelo de Duane pode ser estatisticamente representado por um processo Weibull isto permitiu que o modelo Crow-AMSAA pudesse ser aplicado em avaliações do crescimento da confiabilidade dos sistemas ou componentes. (*Reliability Growth & Repairable System Data Analysis Reference - Reliasoft Corporation*).

Para aplicar a análise de Crow-AMSAA ao sistema modificado, composto pelos tubos de aço carbono, foram avaliados os dados dispostos na tabela 1 e a análise foi desenvolvida através do software “*Reliability Growth Analysis*” RGA da Reliasoft. Na sequência foram

extraídos os tempos até falhar em formato não acumulativo que em outras palavras significa que cada incremento de tempo corresponde a uma nova falha ocorrida.

O cerne da questão foi observar qual foi impacto dos longos tempos entre manutenções na vida útil do trocador. A análise basicamente consistiu em avaliar o beta do modelo. No caso do modelo Crow AMSAA “quando o beta é igual a 1(um) o TMEF – tempo médio entre falhas - (“*MTBF*” - do inglês) não apresenta mudanças ao longo do tempo, contudo o TMEF acumulado é igual ao TMEF instantâneo. Se o Beta é maior do que 1(um), então o TMEF decresce ao longo do tempo e o TMEF acumulado é maior que o TMEF instantâneo. Se o Beta for menor do que 1(um) então o TMEF do sistema cresce ao longo do tempo e o TMEF acumulado é menor do que o TMEF instantâneo.” (*Reliability Growth & Repairable System Data Analysis Reference - Reliasoft Corporation*).

A tabela 4 apresenta os tempos até falhar do trocador aplicados no RGA

Tabela 4 Tempos até falhar

Tempos até falhar em dias
2836
2399 (*)
1539(*)
592(*)
1888(*)

Fonte: Autoria
Própria

(*) Observação – Momento do aparecimento da falha sem considerar os intervalos de tempo para a substituição do feixe.

Uma vez realizada a análise, resumida na tabela 5, com o modelo Crow-AMSAA chegou-se ao Beta de 2,181 indicando a situação onde o TMEF do sistema é decrescente de acordo com o gráfico 06 e o TMEF acumulado (linha azul diagonal externa) é maior do que o TMEF instantâneo (linha diagonal negra interna). No gráfico 07 são mostrados os limites de confiança bilaterais para um nível de confiança de 90% com um nível de significância de 10%. E, com base nestes limites, pode-se afirmar, com certeza estatística, que o TMEF da

população original, desconhecido, se encontrará dentro do intervalo de confiança especificado com um nível de significância de 10% e uma certeza de 90%.

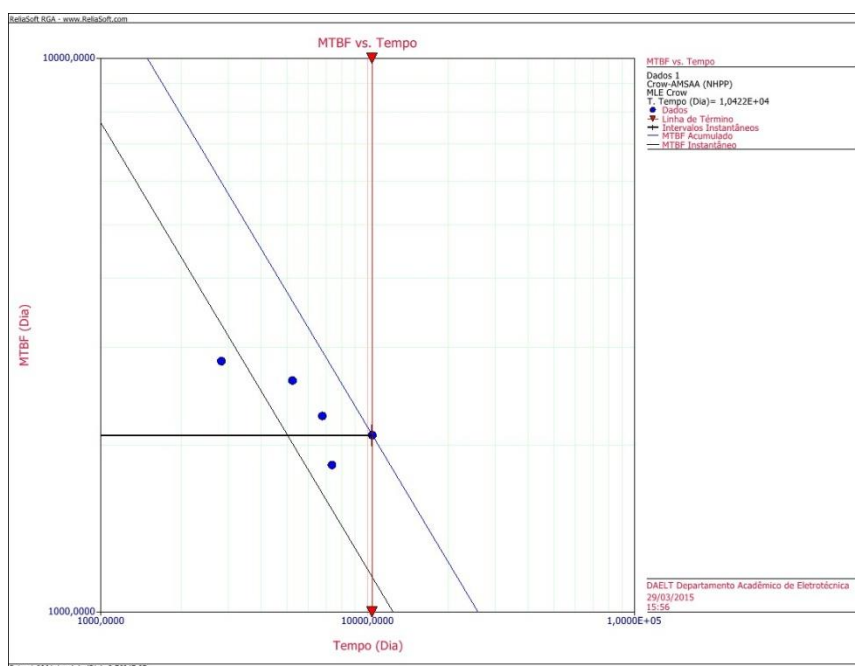
Dados do modelo obtidos após análise realizada no RGA estão na tabela 5

Tabela 5 Relatório de resultados simplificados

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de	Resultad
Informações do	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de
Empresa	
Data	30/03/20
Parâmetr	
Modelo	Crow-AMSAA (NHPP)
Análises	ML
Beta	2.18
Lambda (Dia)	1.12E-
Taxa de	-
DMTBF (Dia)	848.59
DFI	0.001
Testes	
Nível de	0.1
CVM	Passo
Outra	
Tempo Final	925
Fim do Relatório de Resultados Simplificado	

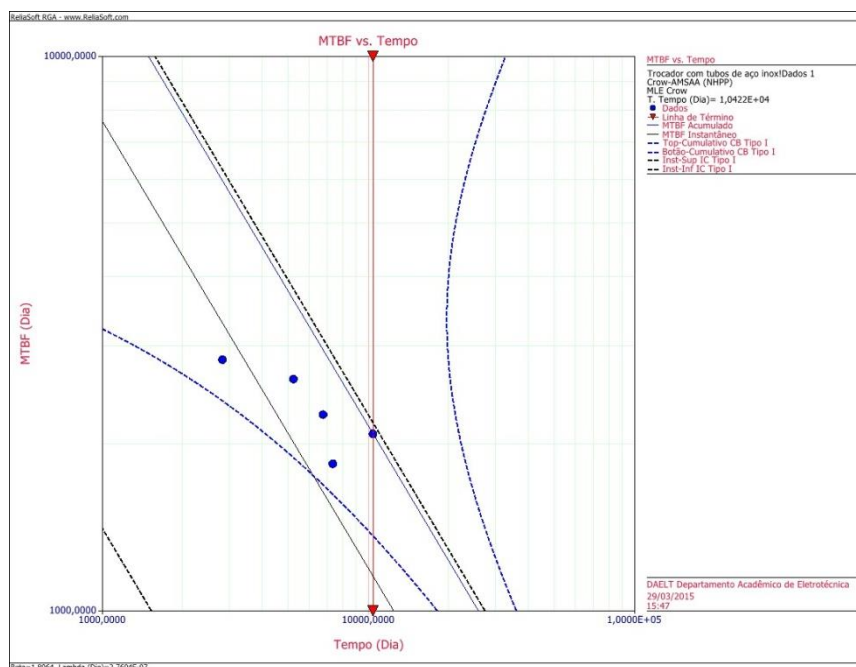
Fonte: Resultado obtido pelo software RGA – Reliasoft

Gráfico 6 TMEF acumulado versus pelo modelo Crow-AMSAA instantâneo obtidos



Fonte – Software RGA – Reliasoft

Gráfico 7 TMEF versus tempo e limites de confiança bilaterais.



Fonte: Software RGA –
Reliasoft

7 Considerações finais

A análise executada neste trabalho evidenciou que o processo não periódico de manutenção tende a diminuir a confiabilidade do feixe quando em campanhas mais longas. Os resultados simulacionais indicaram que um tempo ótimo de operação do trocador seria de 512 dias, ou 1,4 anos, para se assegurar uma confiabilidade de $C(t)=0,96$ estabelecendo um marco para a programação das preventivas baseado na análise estatísticas das falhas e não mais na observação da última inspeção, tal procedimento que foi apontado como inadequado para a programação das preventivas.

A análise de dados de vida realizada a posteriori indicou a sensível mudança no comportamento de falhas ocorrida pela mudança do material dos tubos. Porém, devido que os eventos de um sistema reparável são dependentes e não identicamente distribuídos logo a análise de dados de vida não poderia ser utilizada adequadamente, pois, requer que os eventos sejam independentes e identicamente distribuídos e não é o caso de sistemas reais.

Assim dado às limitações da Análise de Dados de Vida, foi necessário realizar um estudo baseado no Modelo Crow-AMSAA que apontou um TMEF (“*MTBF*” do inglês) decrescente que em outras palavras significa que a política de manutenção empregada no sistema, já modificado com os tubos de aço carbono, estava contribuindo para o aumento da incidência de falhas no sistema.

Na sequência são apresentadas algumas considerações relevantes sobre o trocador:

- a) Por meio da na análise de FTA foi possível identificar que a principal causa é a corrosão sob depósitos devido ao detalhe construtivo do equipamento que apresentava uma condição de acúmulo maior na região próxima ao espelho superior, potencializada pelo baixo fluxo de AGR como também pelos tempos muito longos entre inspeções ou até mesmo por uma agenda de intervenções sem critérios quantitativos resultando em longos tempos operação sem a limpeza do feixe;
- b) O primeiro feixe de aço carbono operou por 2836 dias e foi substituído em final de vida útil, entretanto é importante ressaltar que neste período ocorreu um maior número de intervenções preventivas, totalizando sete, sendo a maior campanha de 624 dias.
- c) O segundo feixe de aço carbono foi substituído após 2480 dias de operação e passou por quatro intervenções preventivas e duas corretivas (falha) no período. A maior campanha foi de 1192 dias sem falhas.
- d) O terceiro feixe de aço carbono foi substituído após 1790 dias de operação e passou por três intervenções preventivas e uma corretiva (falha) no período. A maior campanha foi de 626 dias.
- e) O quarto feixe de aço carbono foi substituído após 3638 dias de operação e passou por duas intervenções preventivas e duas corretivas (falha) no período. A maior campanha foi de 1888 dias.
- f) O tempo médio entre manutenções dos quatro feixes de aço carbono é 512 dias considerando todas as intervenções preventivas e corretivas. O primeiro feixe o tempo médio de intervenção foi de 405 dias e não ocorreu nenhuma falha no período até a substituição preventiva do feixe. Já os demais feixes apresentaram falhas durante seu tempo de vida e o principal fator que as potencializou está relacionado ao longo tempo de campanha, como pode ser observado nos dados de vida do segundo e quarto feixe que apresentaram campanhas isoladas de 1192 e 1888 dias respectivamente. Já que o mecanismo de deterioração é por corrosão sob depósitos, quanto maior o tempo em

- operação sem realizar limpeza do feixe durante as manutenções preventivas, pior é o ataque corrosivo nos tubos, devido ao maior acúmulo de depósitos.
- g) Para finalizar, a simulação do sistema evidenciou que para uma confiabilidade acima de $C(t)=0,95$ seria necessário realizar manutenção preventiva dentro da média histórica de 512 dias que seria considerado como tempo ótimo de operação com a substituição preventiva do trocador mesmo antes do final de sua vida útil. Entretanto essa periodicidade é considerada inviável já que a campanha operacional normal é de 730 dias (tempo entre paradas programadas para manutenção).
 - h) Como a campanha operacional é ditada por outros sistemas da planta assume-se então, para o trocador, o tempo de 730 dias (2 anos), porém, com um decréscimo na confiabilidade de 5% de 0,96 para 0,91.
 - i) A análise econômica realizada no item 5.1 mostrou que os custos de manutenção são mais altos quando ocorre falha do feixe, além disso, foi provado pelos cálculos que existe um tempo ótimo para substituição do feixe que deve ser determinado quando se adotar um plano de manutenção preventiva periódico de 730 dias.

8 Propostas para estudos futuros

Como proposta para um trabalho futuro seria estender esta análise aos demais trocadores de calor e equipamentos com histórico de falhas dos demais sistemas da planta, e assim determinar o tempo ótimo para manutenção preventiva baseados em uma análise de confiabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS

TELLES, Pedro C. Silva. **Vasos de pressão**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

BIROLINI, Alessandro. **Reliability engineering: theory and practice**. New York: Springer, 2007.

NIKOLAIDIS, Efstratios, GHIOCEL, Dan M., SINGHAL, Suren, **Engineering Design Reliability Handbook**. Estados Unidos da América: CRC Press LLC, 2005.

PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Confiabilidade a quarta dimensão da qualidade, conceitos básicos e métodos de cálculo**. São Paulo, 2006.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Manual técnico de caldeiras e vasos de pressão NR-13**. Brasília: Secretaria de Inspeção do Trabalho, 2014.

SCAPIN, Carlos Alberto. **Análise Sistêmica de Falhas**. Brasil: IDNG Tecnologia e Serviços Ltda, 2007. GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

AUGUSTO COSTA, Cid. **Análise e gerenciamento de risco**. Curitiba: UTFPR, 2014. Apostila do curso de especialização em Engenharia de Confiabilidade. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RIGONI, Emerson. **Metodologia de análise de falhas**. Curitiba: UTFPR, 2014. Apostila do curso de especialização em Engenharia de Confiabilidade. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SIMONETTI, Marcelo J., SOUZA Anderson L., SILVEIRA, Luiz F. S., ARRUDA, João P. S.. **A importância da engenharia da confiabilidade e os conceitos básicos de distribuição de Weibull**. Disponível em: http://www.revistasapere.inf.br/download/engenharia_da_confiabilidade_distribuicao_weibull.pdf. Acesso em 66 Out. 2014.

PETROBRAS, Fafen-PR. **Pastas/arquivos de Inspeção do Setor de Inspeção de Equipamentos Fafen-PR**. Araucária: 2014.

RELIABILITY HOT WIRE, Reliasoft. **Conceitos de confiabilidade, características da distribuição de Weibull**. Brasil: Reliasoft, 2005.

RELIABILITY GROWTH & REPAIRABLE SYSTEM DATA ANALYSIS REFERENCE. Tucson, Arizona, Reliasoft Corporation