

ANÁLISE DE FALHAS

TÓPICOS DE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

LUIS HENRIQUE TERBECK PINTO

ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO CENTRAL

2004-NOVEMBRO

SUMÁRIO

I	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	6
1	INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE FALHAS	6
1.1	Objetivos do Curso	6
1.2	Objetivos da abordagem por Análise de Falhas	8
2	INTRODUÇÃO A ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	11
2.1	Princípios básicos da Teoria da Confiabilidade	11
2.1.1	A Função Confiabilidade - $R(t)$	11
2.1.2	A Função Taxa de Falha - $z(t)$	13
2.1.3	Função Confiabilidade e Taxa de Falha para distribuições exponenciais	14
2.2	Obtenção de parâmetros de confiabilidade a partir de históricos de falhas	17
2.2.1	Cálculo da Taxa de Falha Exponencial λ	17
2.2.2	Cálculo do MTTR	21
2.2.3	Cálculo da Disponibilidade Média - A%	22
2.2.4	Tempos para falha	23

2.2.5	Aplicação prática - utilização da Planilha de Análise de Falhas	24
2.3	Análise funcional de sistemas	27
2.3.1	Representação de sistemas através de Diagramas de Blocos Funcionais - SADT	27

II RCM 33

3 PRINCÍPIOS DE RCM 33

3.1	Introdução	33
3.2	Evolução histórica do RCM	35
3.3	A Análise RCM	37
3.3.1	Definição da abrangência das análises RCM	39
3.3.2	Definição dos Trabalhos-Padrão de Manutenção	39
3.4	Princípios do RCM	43
3.5	Apresentação da Metodologia RCM	45
3.5.1	Definição de Falha	45
3.5.2	Definição de Modo de Falha	45
3.5.3	FMEA e RCM	46
3.5.4	Formulário e Padrões	46

3.5.5	Criticidade e Probabilidade de Ocorrência da falha	50
3.5.6	Causas de falhas	53
3.5.7	Aplicação prática	54
3.6	Conclusão sobre os Objetivos do RCM	55

III ANÁLISE DE CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHA 56

4	INTRODUÇÃO A ANÁLISE DE CAUSAS FUNDAMENTAIS	56
4.1	Definições	57
4.2	Detalhamento das etapas de análise	58
4.2.1	Coleta de dados	58
4.2.2	Avaliação.	58
4.2.3	Detalhamento de ações de contenção	60
4.2.4	Documentação	60
4.2.5	Acompanhamento das ações	61
4.3	Ànálise de Eventos e Fatores Causais	62
4.4	Aplicação prática	64

GLOSSÁRIO

- MTTF - Mean Time To Failure.
- MTTR - Mean Time To Repair.
- FMEA - Failure Modes and Effects Analysis.
- SADT - Standard Analysis and Design Technique.
- RCM - Reliability Centered Maintenance.
- MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade.
- PT&I - Preventive Test and Inspection.

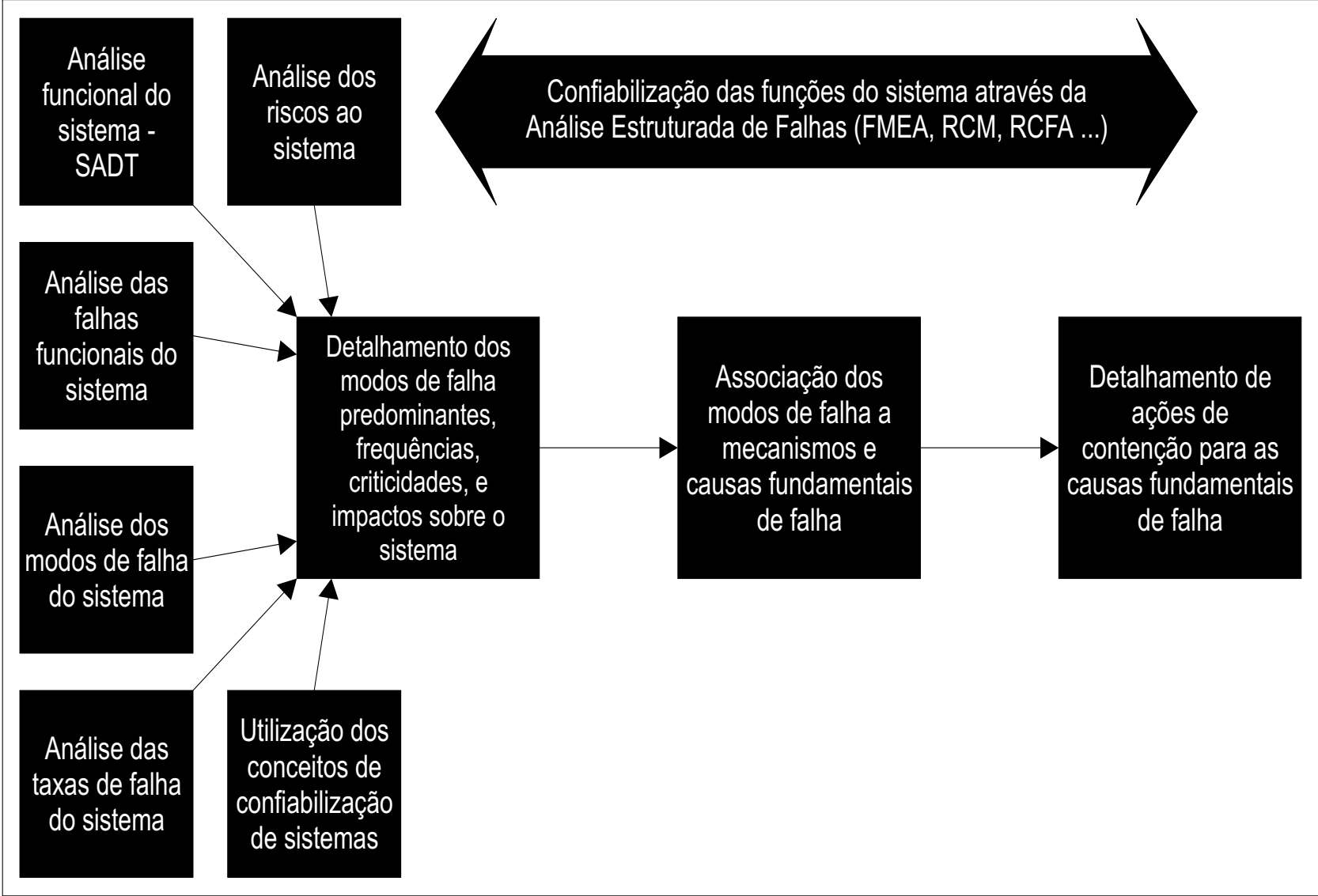
PARTE I

ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE FALHAS

1.1 OBJETIVOS DO CURSO

- Conceituar teoricamente a Análise Estruturada de Falhas.
- Propiciar uma visão objetiva das ferramentas de organização de informações sobre modos de falha de um sistema e suas causas fundamentais.
- Conceituar a análise do Grau de Prioridade em função dos riscos sobre o sistema e a estruturação de planos de contingência para cada um dos modos de falha informados.
- Mostrar a aplicabilidade prática das ferramentas FMEA e RCFA.
- Padronizar a utilização de ferramentas estatísticas na análise de modos de falha e seus impactos sobre o sistema e sobre o processo.



1.2 OBJETIVOS DA ABORDAGEM POR ANÁLISE DE FALHAS

Os objetivos principais da metodologia de análise de falhas são:

- Estruturar a planificação das manutenções preventivas, preditivas e pró-ativas de acordo com os modos de falha predominantes em cada equipamento e a análise dos riscos representativos ao sistema.
- Assegurar o controle das causas fundamentais identificadas para cada modo de falha, e minimizar seu impacto sobre o funcionamento do sistema (aumento do tempo médio entre falhas de um equipamento).
- Amparar as análises de confiabilidade e as tomadas de decisões em trabalhos de planejamento da manutenção e eliminação de perdas produtivas.
- Auxiliar as estratégias de formação dos efetivos de manutenção através da observação das necessidades observadas durante as análises das falhas já vivenciadas ou potenciais.

Os efeitos dos trabalhos de análise de falhas sobre o sistema de manutenção estão ilustrados na Fig. 1.

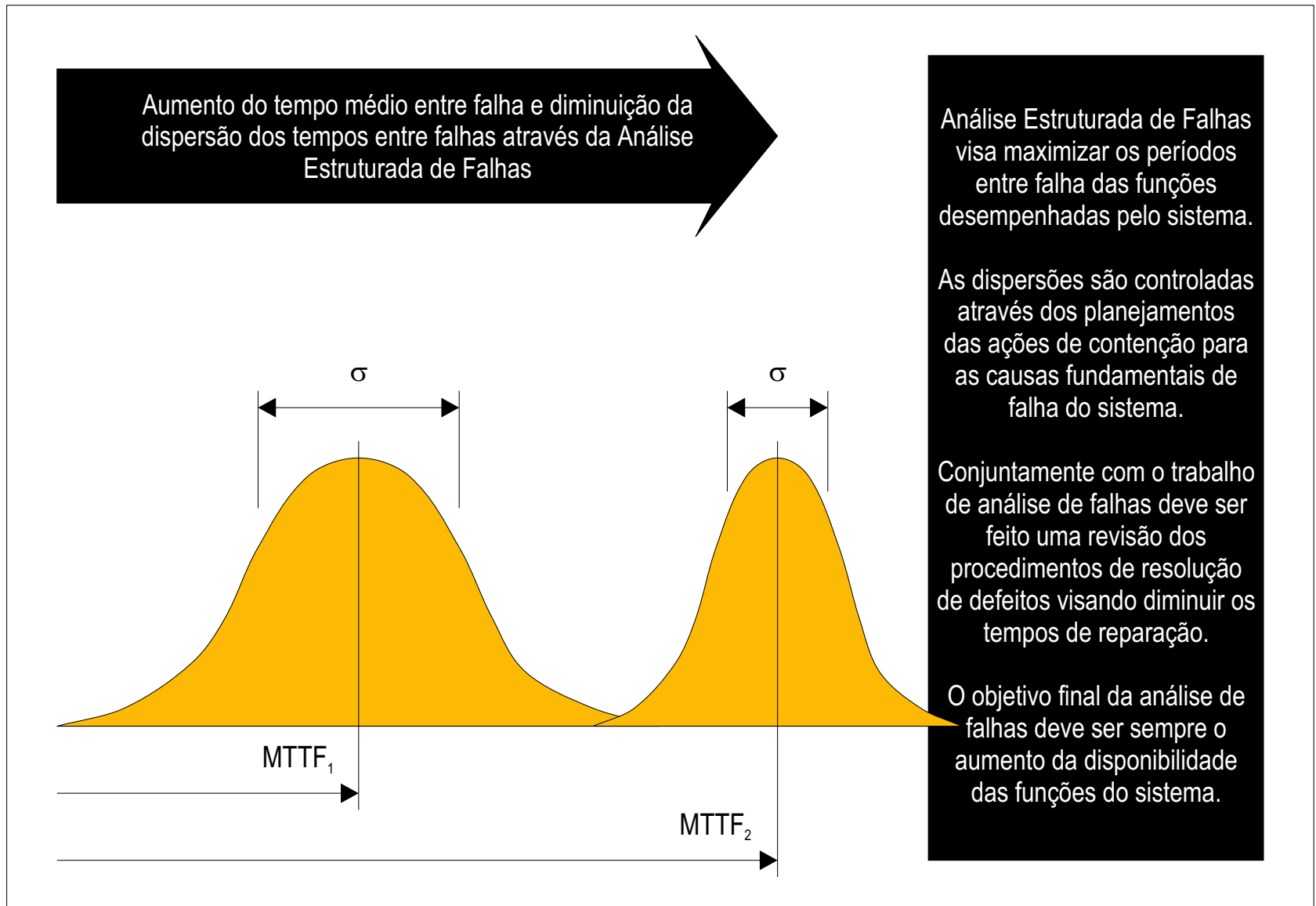


Figura 1: Evolução da eficiência do sistema de manutenção através da implementação da análise estruturada de falhas e causas fundamentais

Resumo dos objetivos da abordagem por análise de falhas:

MAXIMIZAR o MTTF dos equipamentos através da contenção das causas fundamentais das falhas; e **QUALIFICAR** o sistema de manutenção visando a **MINIMIZAÇÃO** do emprego de insumos (\$) e de mão-de-obra (MTTR).

2 INTRODUÇÃO A ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TEORIA DA CONFIABILIDADE

2.1.1 A FUNÇÃO CONFIABILIDADE - $R(t)$

A função confiabilidade designada por $R(t)$ - Reliability - retorna a probabilidade de um sistema, equipamento ou componente sobreviver sem falha no decorrer de um intervalo de tempo $t \geq 0$, ou seja

$$R(t) = \Pr(T \leq t) \quad t \geq 0 \quad (1)$$

onde lê-se: $R(t)$ é a probabilidade de que um evento T ocorra no intervalo de tempo $[0; t]$

A função confiabilidade será sempre decrescente com o tempo, pois as probabilidades de sobrevivência de um componente sempre diminuem de acordo com a taxa de utilização e em razão dos mecanismos de desgaste e de fadiga.

As expressões matemáticas que definem a função confiabilidade dependem diretamente do tipo de distribuição estatística a que os tempos para falha estejam associados. Assim, podem existir funções de confiabilidade que se enquadram como distribuições exponenciais, normais, log-normais, Weibull, Poisson, etc.

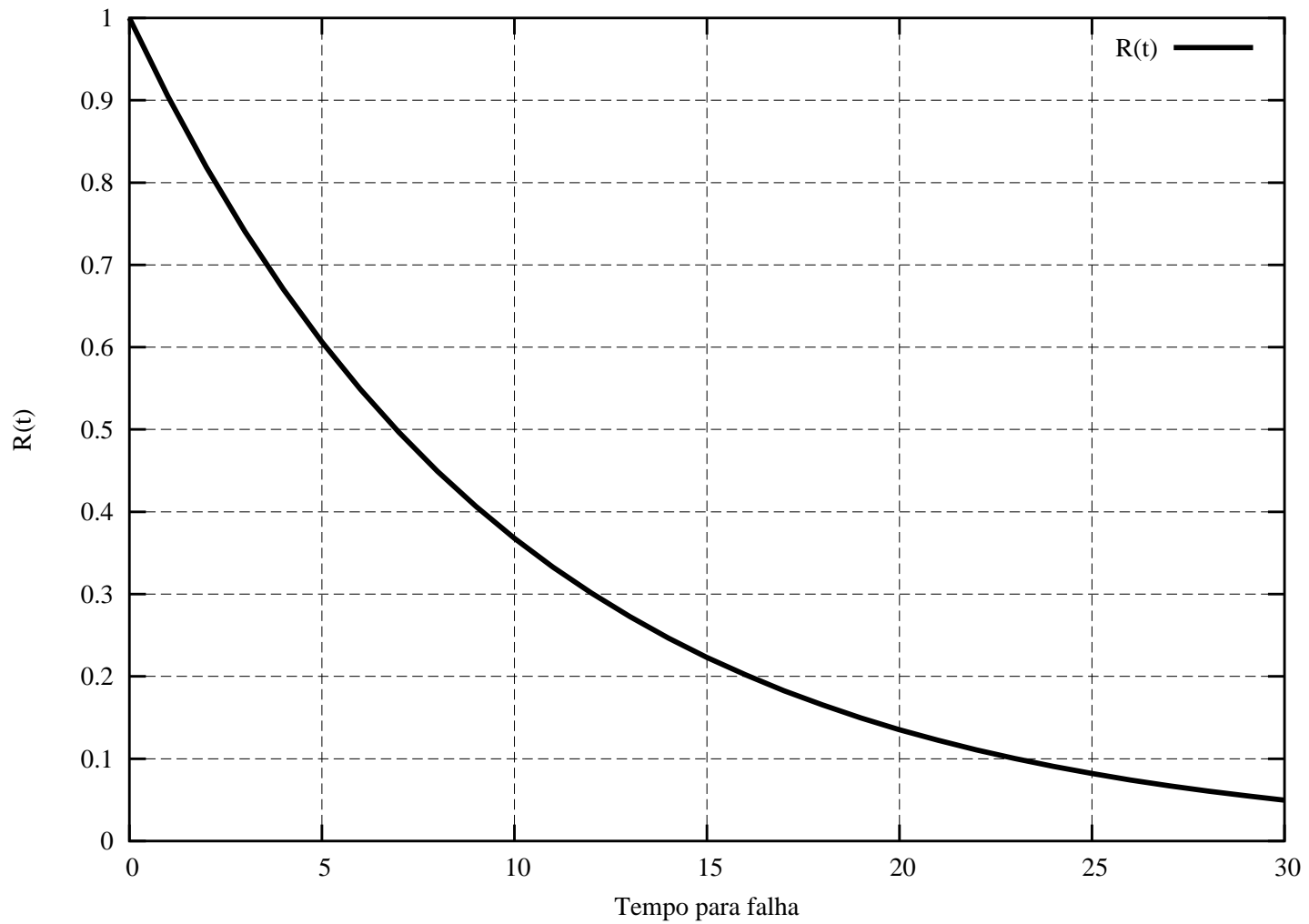


Figura 2: Exemplo da função confiabilidade $R(t)$ para tempos para falha distribuídos exponencialmente.

2.1.2 A FUNÇÃO TAXA DE FALHA - $z(t)$

A probabilidade de que um item venha a falhar durante um intervalo $(t; t + \Delta t]$, sabendo-se que o item está funcionando no instante de tempo t é dada pela expressão

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t)}{\Pr(T > t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2)$$

Dividindo-se esta probabilidade pelo intervalo de tempo Δt , e fazendo-se com que $\Delta t \rightarrow 0$, tem-se a definição da *função taxa de falha* $z(t)$ do item, ou seja

$$\begin{aligned} z(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \\ &= \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (3)$$

onde $f(t)$ é denominada *função densidade de probabilidade*.

A Eq. 3 implica diretamente

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \approx z(t) \Delta t \quad (4)$$

2.1.3 FUNÇÃO CONFIABILIDADE E TAXA DE FALHA PARA DISTRIBUIÇÕES EXPONENCIAIS

No decorrer deste curso será dedicada atenção especial a distribuição exponencial de tempos para falha. Este tipo de distribuição relaciona-se com a função confiabilidade através da expressão

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad t \geq 0 \quad (5)$$

Outras relações importantes que podem ser obtidas para a distribuição de tempos para falha exponenciais são:

$$z(t) = \lambda \quad (6)$$

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

$$\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \lambda \Delta t \quad (8)$$

Exercício: Sabido que a taxa de falha $z(t)$ de um componente é constante e igual a $2,99 \times 10^{-3}$ falhas/dias, e que o tempo de operação acumulado do componente é de aproximadamente 175 dias, pede-se calcular:

1. O parâmetro λ da função confiabilidade.
2. O MTTF do componente.
3. A probabilidade de que o componente sobreviva por mais 100 dias.
4. Caso o componente tenha sobrevivido aos 100 dias citados no item 3, qual a probabilidade de que sobreviva ainda por mais 100 dias?
5. O que é possível notar quando se faz a comparação entre as respostas dos itens 3 e 4?

... espaço para resolução ...

2.2 OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE A PARTIR DE HISTÓRICOS DE FALHAS

2.2.1 CÁLCULO DA TAXA DE FALHA EXPONENCIAL λ

A obtenção de qualquer parâmetro de confiabilidade de um equipamento somente pode ser feita através da observação dos históricos de falhas de seus componentes.

Admitindo-se que os tempos para falha estejam distribuídos exponencialmente, o parâmetro de confiabilidade a ser calculado a partir da observação de históricos passa a ser exclusivamente a taxa de falha λ , a qual é dada pela expressão

$$\lambda = \frac{k}{n \Delta t} \quad (9)$$

onde Δt é o intervalo de tempo de observação (em meses, semanas, dias, horas, etc), n é a população de equipamentos que está sendo analisada, e k é o número de falhas observadas durante o intervalo Δt .

Uma vez calculada a taxa de falha do equipamento, o número de falhas esperadas k_{\square} para um novo intervalo de tempo Δt_{\square} será então calculada pela expressão

$$k_{\square} = n \lambda \Delta t_{\square} \quad (10)$$

Exemplo: Durante 12 meses foram analisados 10 unidades de geração de água gelada, cada uma contendo um elemento compressor, e este contendo 2 conjuntos de mancais flutuantes os quais apresentaram 19 falhas por desgaste no decorrer do período.

Com base nestes dados calcular a taxa de falha individual, o MTTF de cada conjunto de mancais flutuantes e a quantidade provável de itens que deverão falhar nos próximos 30 dias. Considerar que as unidades operam cada uma 16 horas por dia.

1. Cálculo do intervalo de tempo de observação:

$$\Delta t = 12 \text{ meses} \times 30 \frac{\text{dias}}{\text{mês}} \times 16 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 5.760 \text{ horas}$$

2. Cálculo da taxa de falha individual do conjunto de mancais:

$$\lambda = \frac{19}{2 \times 10 \times 5.760} = 1.65 \times 10^{-4} \frac{\text{falhas}}{\text{hora}}$$

3. Cálculo do MTTF do conjunto de mancais:

$$\text{MTTF} = \frac{1}{1.65 \times 10^{-4}} = 6.060 \text{ horas}$$

4. Cálculo do número provável de falhas em 30 dias:

$$k_{30} = 2 \times 10 \times 1.65 \times 10^{-4} \times 30 \times 16 = 1,58 \text{ falhas}$$

Exercício: Um fabricante de equipamentos realizou um teste em bancada de 5 cilindros hidráulicos com especificações idênticas e notou que as unidades de 1 a 5 falharam após períodos de 600 horas, 650 horas, 655 horas, 850 horas e 1.050 horas respectivamente. Com base nestes dados pede-se calcular:

1. A taxa de falha do componente, assumindo-se que os tempos para falha estão distribuídos exponencialmente.
2. O MTTF do componente.
3. O número de falhas esperados para um equipamento equipado com 12 destes componentes em um período de 200 horas (k_{200}).

... espaço para resolução ...

2.2.2 CÁLCULO DO MTTR

Os tempos para reparo de falhas, a exemplo dos tempos para falha, podem estar associados a distribuições estatísticas distintas. Porém, para que a análise de falhas seja simplificada, assume-se normalmente uma distribuição exponencial dos tempos para reparo, de modo que o valor do MTTR - *Mean Time To Repair* é obtido da média aritmética dos tempos para reparo TTR_i com $i \in \{1, 2, \dots, k\}$, ou seja

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^k TTR_i}{k} \quad (11)$$

onde k é o número de falhas observadas no período de análise.

Exemplo: Para as 19 falhas por desgaste observadas nas unidades de geração de água gelada do exemplo anterior foram registrados os seguintes valores em horas para os TTR_i : 10, 5, 2, 12, 1, 7, 10, 7, 7, 4, 10, 13, 1, 5, 3, 8, 2, e 9. Com base nestes valores calcular o MTTR.

$$MTTR = \frac{2 \times 1 + 2 \times 2 + 3 + 4 + 2 \times 5 + 3 \times 7 + 8 + 9 + 3 \times 10 + 11 + 12 + 13}{19} = \frac{116}{19} \approx 6,1 \text{ horas}$$

2.2.3 CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE MÉDIA - A%

De forma simplificada, pode-se definir o tempo Δt de análise de um determinado equipamento como sendo a soma da parcela de tempo Δt_{DISP} correspondente ao período em que o equipamento esteve disponível para a operação, e da parcela de tempo Δt_{INDISP} correspondente ao período em que o equipamento esteve indisponível. Com estes dois valores, define-se então a *Disponibilidade Média* do equipamento através da expressão

$$A\% = \frac{\Delta t_{\text{DISP}}}{\Delta t_{\text{DISP}} + \Delta t_{\text{INDISP}}} \times 100 \quad (12)$$

Esta equação é generalizada para a determinação da disponibilidade média de um equipamento em qualquer intervalo de tempo $\Delta t \geq 0$, embora para processos nos quais as distribuição dos tempos para falha TTF_i e dos tempos para reparo TTR_i sejam exponenciais, defina-se normalmente a disponibilidade média através da expressão

$$A\% = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \times 100 \quad (13)$$

Exemplo: Sabendo-se que um determinado componente possui MTTF e MTTR iguais a 250 e 4,5 horas respectivamente, qual o seu impacto na disponibilidade média A% do conjunto?

$$A\% = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} = \frac{250}{250 + 4,5} \approx 98,23\% \quad (1,77\%)$$

2.2.4 TEMPOS PARA FALHA

Em processos de manutenção preventiva costuma-se fazer a planificação das intervenções com base em intervalos de tempos pré-estabelecidos. Estes intervalos em algumas análises são empíricos e não levam em consideração as distribuições dos tempos para falha dos componentes.

Uma das opções para a definição destes intervalos é a utilização de estimativas de tempos até a ocorrência de falha de uma determinada percentagem da população de componentes. Com base neste conceito e na adoção da hipótese de distribuição exponencial dos tempos para falha, tem-se que o tempo para falha de uma percentagem p da população é dado pela expressão

$$t_{p\%} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{1}{1-p} \right) = \text{MTTF} \ln \left(\frac{1}{1-p} \right) \quad (14)$$

Exemplo: A definição do intervalo de manutenção preventiva de um determinado componente pretende ser feita com base na estimativa do tempo até a falha de 10% da população do mesmo ($p = 10\%$). A taxa de falha estimada para o componente é de aproximadamente $1,22 \times 10^{-4}$ falhas/hora. Determinar $t_{10\%}$ com base na Eq. 14.

$$t_{10\%} = \frac{1}{1,22 \times 10^{-4}} \ln \left(\frac{1}{1-10\%} \right) \approx 863,0 \text{ horas}$$

2.2.5 APLICAÇÃO PRÁTICA - UTILIZAÇÃO DA PLANILHA DE ANÁLISE DE FALHAS

Em um circuito de refrigeração são utilizados 6 compressores a parafuso em regime de 16 horas/dia cada um, e períodos de 360 dias/ano.

Estes equipamentos foram monitorados por 3 anos, e neste período foram observadas as falhas sobre 9 conjuntos/componentes principais, os quais estão abaixo listados juntamente com as quantidades instaladas por compressor, o número de falhas observadas, o MTTR e o custo de reparação de cada um.

Componente/conjunto	n_j	k_j	MTTR	$\$_{MAT.}$
1: Mancais flutuantes	4	8	16,0	6.175
2: Selo de vedação entre estágios	3	7	8,2	3.200
3: Válvula de controle de sobre-pressão	1	3	2,5	2.450
4: Conjunto de parafusos	3	1	36,0	12.200
5: Motor elétrico	1	1	12,5	6.350
6: Conversor de frequência	1	2	3,5	14.750
7: Bomba hidráulica	2	3	2,5	3.550
8: Controlador de sobre-temperatura	1	1	1,5	1.750
9: Conjunto de engrenagens	3	1	4,5	7.890

O custo horário de reparação é da ordem de 26,00 \$/hora.

Com base nestes dados e com o auxílio da planilha de análise de falhas calcular:

1. A taxa de falha e o MTTF de cada conjunto/componente.
2. A quantidade de falhas esperadas para o período de 1 ano.
3. A disponibilidade média anual A% de cada compressor.
4. A estimativa anual de custo com manutenções para cada compressor.
5. O tempo para falha de 1%, 10%, 25% e 50% da população de cada um dos conjuntos/componentes.
6. Calcular individualmente e sem o auxílio da planilha de análise de falhas o valor do MTTF, a quantidade de falhas esperadas no período de um ano e a disponibilidade média anual do primeiro conjunto. Comparar com os valores obtidos através do uso da planilha.

... espaço para resolução ...

2.3 ANÁLISE FUNCIONAL DE SISTEMAS

2.3.1 REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE BLOCOS FUNCIONAIS - SADT

O método *SADT - Standard Analysis and Design Technique* é uma das técnicas empregadas na representação sistemas através de diagramas de blocos. Normalmente os diagramas funcionais são desenvolvido anteriormente a qualquer análise de falhas, em razão da necessidade de detalhamento dos sinais de entrada e saída, bem como os mecanismos de controle necessários à execução de uma determinada função pelo sistema.

A representação de uma função através de um bloco SADT é feita considerando-se os seguintes aspectos sobre os componentes que a desempenham:

- **Função:** a definição da função a ser executada pelo componente, e das performances exigidas para o contexto.
- **Entradas:** as energias, os materiais e ou as informações necessárias à execução da função.
- **Controles:** os controles e outros elementos que limitam ou governam a forma como a função é executada.
- **Mecanismos:** as pessoas, os sistemas, as ferramentas ou os equipamentos necessários à execução da função.
- **Saídas:** os resultados da execução da função.

A representação gráfica de um bloco SADT pode ser observada na Fig. 3.

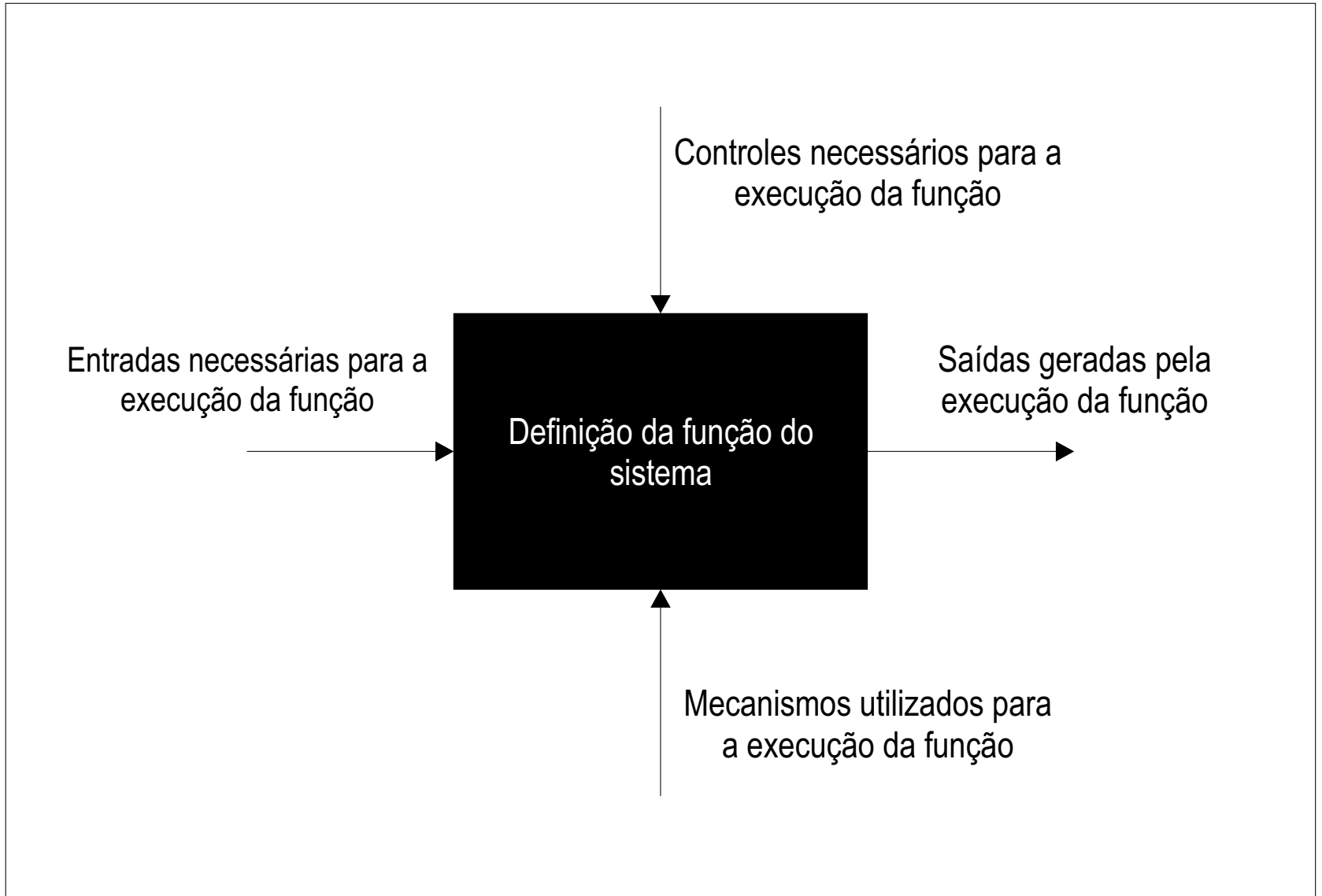


Figura 3: Representação gráfica de um bloco funcional SADT

O formato de diagramação de um sistema através da metodologia SADT deve ser feita através do posicionamento descendente dos blocos funcionais, seguido da representação individualizada das entradas, dos controles e dos mecanismos.

Para tornar a explicação mais simples, encontra-se ilustrada na Fig. 5 a diagramação de um sistema de geração de água gelada (ver lay-out simplificado da Fig. 4). Nesta diagramação devem ser notadas as possibilidades de interligação das entradas, saídas e controles entre os blocos funcionais, da mesma forma como se observa no equipamento já concebido.

Normalmente o método SADT reproduz de forma bastante precisa e pouco complexa o funcionamento dos sistemas representados.

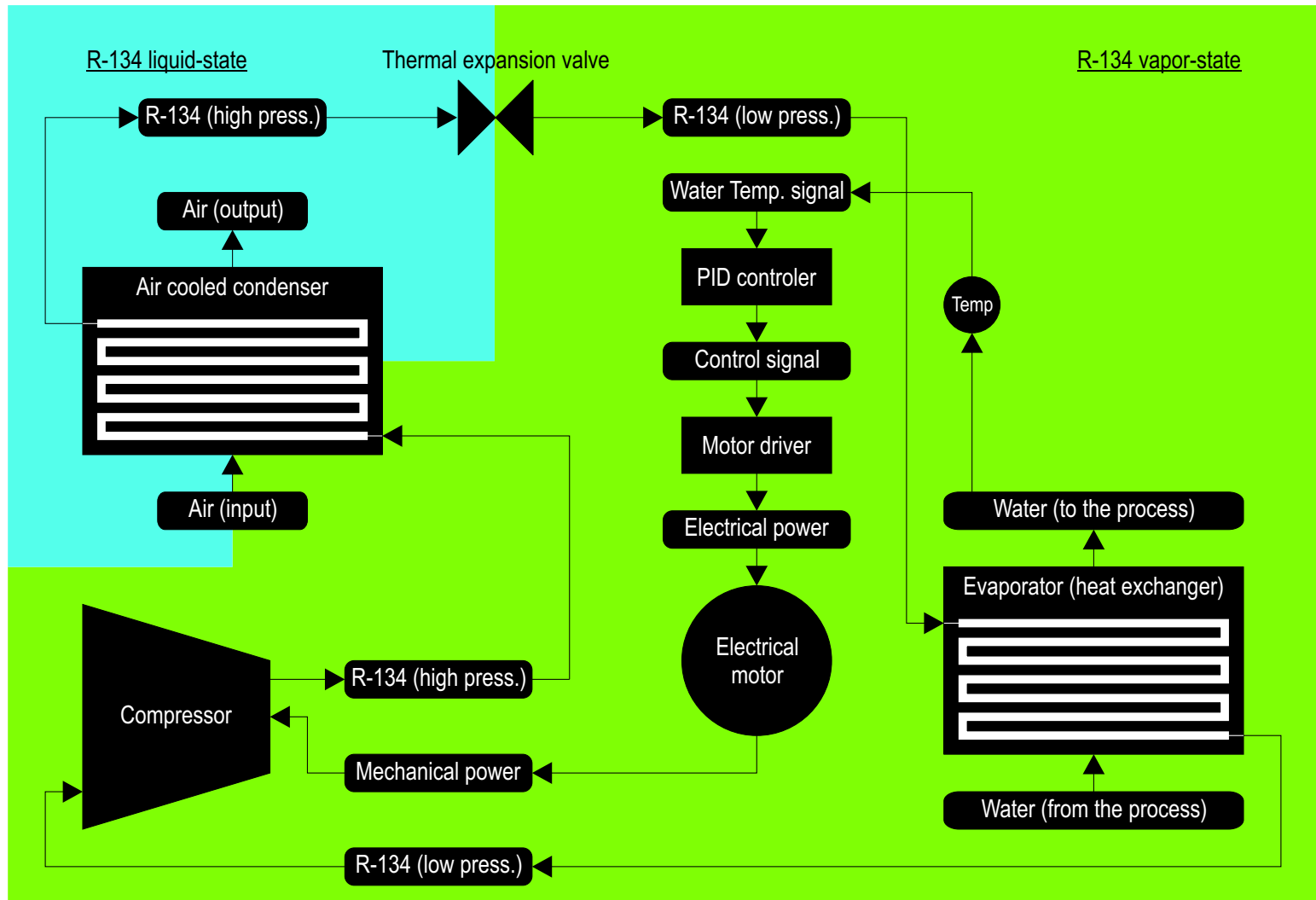


Figura 4: Lay-out simplificado de um sistema de geração de água gelada.

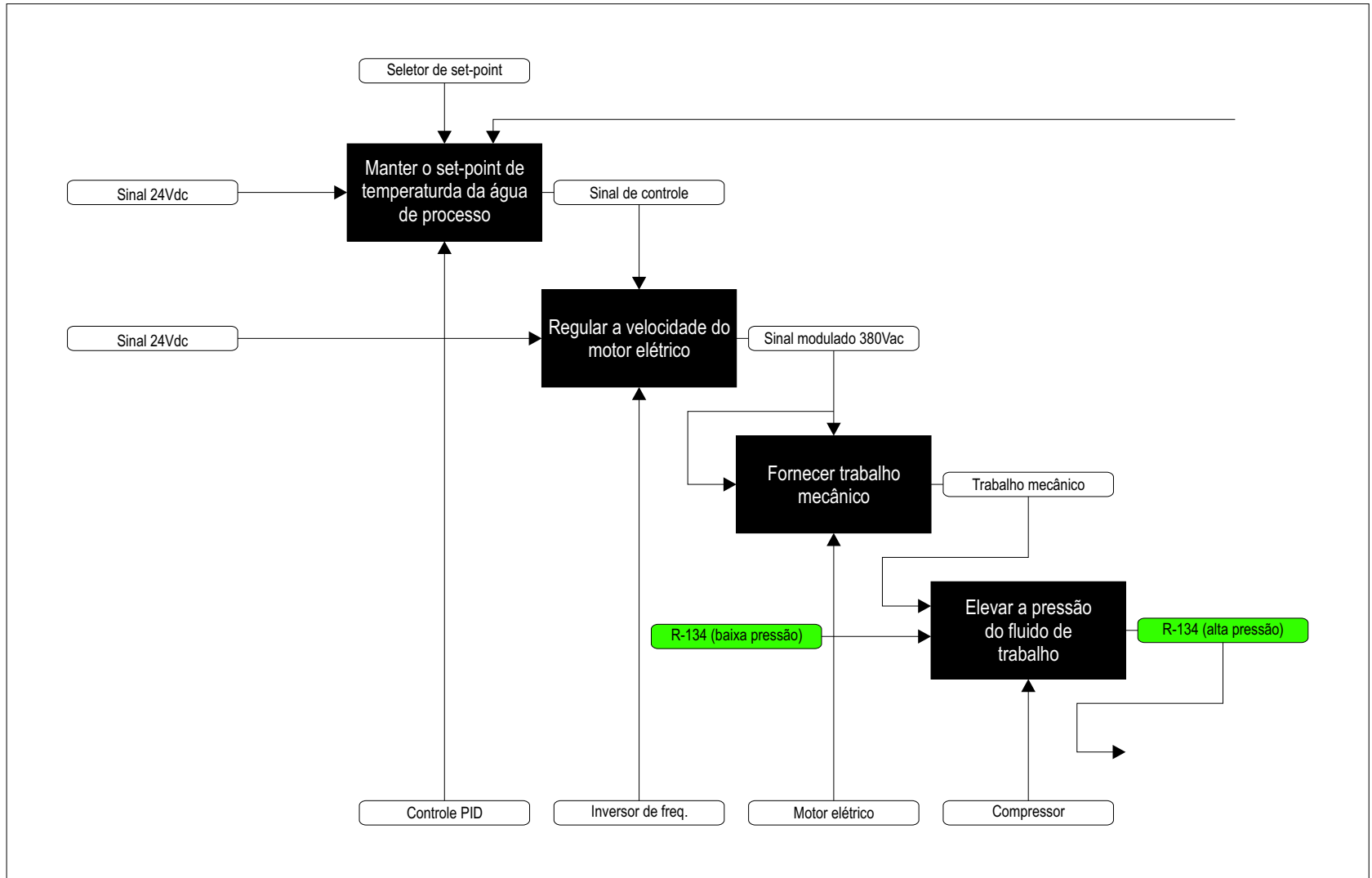


Figura 5: Detalhe parcial da diagramação por blocos funcionais SADT do sistema de geração de água gelada da Fig. 4.

Exercício:

1. Reproduzir através de blocos funcionais SADT a totalidade do sistema ilustrado na Fig. 4 - utilizar folha A3 do anexo.
2. Analisar o impacto sobre o sistema da perda de eficiência do condensador em dias excepcionalmente quentes. Durante a análise levar em consideração a recomendação do fabricante da válvula de expansão para que seu produto não trabalhe com vapor superaquecido no lado de pressão.
3. Que tipo de segurança poderia ser incluído no sistema para impedir que a válvula de expansão trabalhe com R-134 vaporizado?

PARTE II

RCM

3 PRINCÍPIOS DE RCM

3.1 INTRODUÇÃO

Reliability Centered Maintenance (RCM) ou em português *Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)* é o processo utilizado para a determinação do tipo de metodologia de manutenção mais efetivo para o tratamento de falhas potenciais. O processo de desenvolvimento do RCM envolve a identificação de ações que quando executadas irão reduzir a probabilidade de um equipamento, bem como seus custos de manutenção.

O processo busca a melhor combinação entre ações baseadas em condições (*Condition-Based Actions*), ações baseadas em intervalos de tempo ou em ciclos (*Time-Based Actions ou Cycle-Based Actions*), ou simplesmente ações corretivas (*Run-to-Failure approach*) - ver os detalhes de cada uma destas estratégias na Fig. 6. Estas estratégias de manutenção devem ser aplicadas de forma integrada, afim de que seja possível a otimização da eficiência e dos custos de manutenção do sistema avaliado.

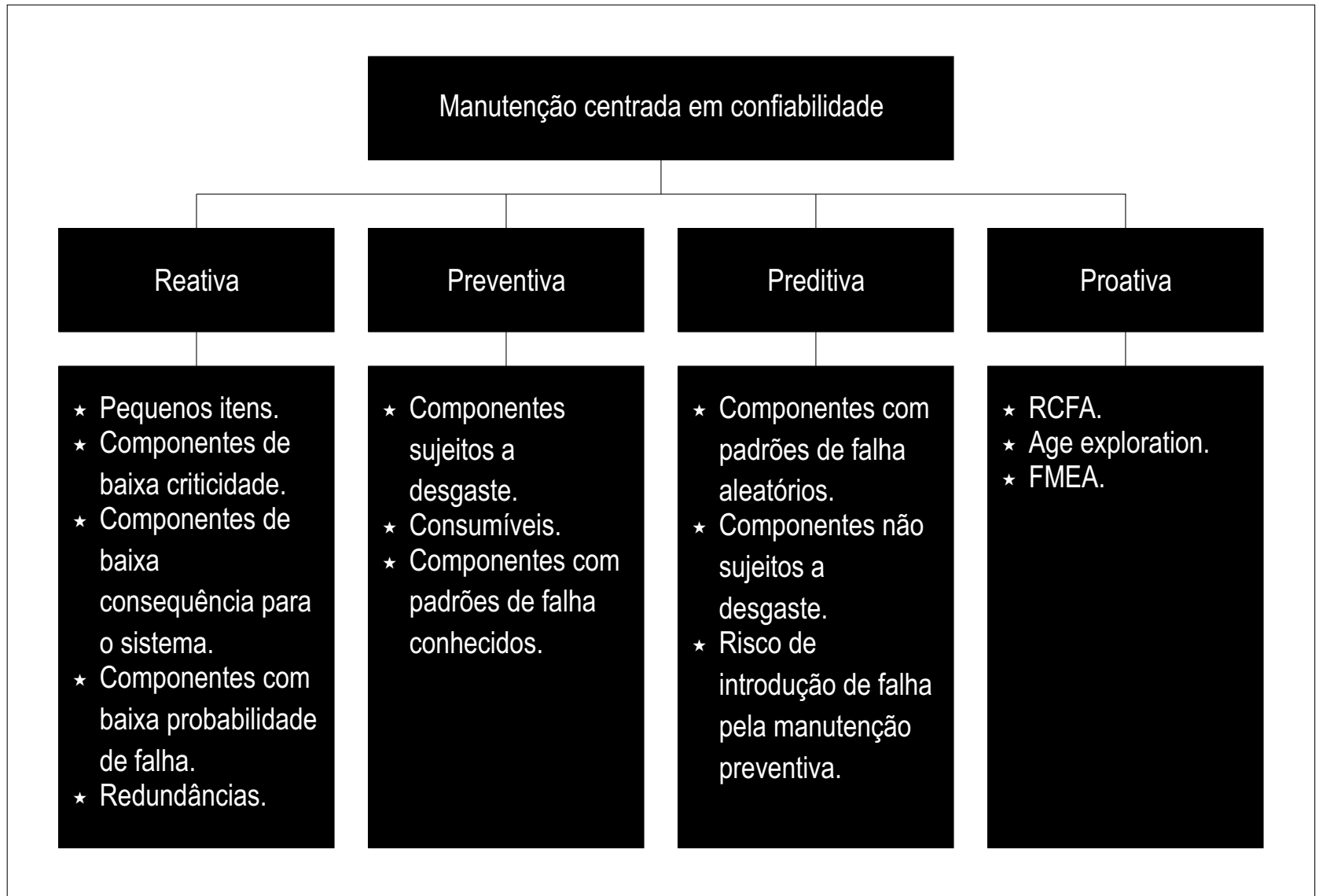


Figura 6: Componentes de um programa RCM.

3.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO RCM

A análise dos programas de manutenção da indústria aeronáutica nas décadas de 1960 e 1970 foi o principal fator que levou ao desenvolvimento dos conceitos de RCM. Os princípios e aplicações do RCM foram documentados e publicados por Nowlan e Heap^a. As análises demonstraram que não existem correlações fortes entre os tempos de utilização e taxas de falhas, o que torna falsa a maioria das premissas assumidas em programas de manutenção baseada em intervalos ou ciclos.

Estudos adicionais desenvolvidos pelo Departamento de Defesa e por diversas usinas de geração de energia confirmaram as proposições de Nowlan e Heap.

Da década de 1960 até o final da década de 1980, a manutenção baseada em intervalos de tempo era a metodologia de contingência de falhas mais avançada utilizada pelos gestores de manutenção. Estes programas baseavam-se em dois princípios:

1. Existe uma forte correlação entre a idade do equipamento e sua taxa de falha.
2. As probabilidades de falha de equipamentos podem ser determinadas estatisticamente, e assim, componentes podem ser substituídos ou restaurados antes da ocorrência de falhas.

Por exemplo: era prática comum no passado a substituição ou renovação de rolamentos após uma determinada quantidade de ciclos em operação, com base na hipótese de que a taxa de falhas deste componente tornava-se acentuada com o tempo de permanência em serviço.

^aF. Stanley Nowlan and Howard F. Heap. *Reliability-Centered Maintenance*. United Airlines and Dolby Press, sponsored and published by the Office of Assistant Secretary of Defense, 1978

Outra metodologia bastante empregada era a chamada *Age Exploration*, onde através da troca dos programas de substituição baseados em tempo por programas de substituição baseados em condição, conseguia-se a extensão da vida útil dos componentes. Esta metodologia foi empregada na década de 1970 pela U. S. Submarine Force após a utilização de análises RCM.

Com a evolução tecnológica da década de 1990 foi então possível a sofisticação dos métodos de monitoramento de condições, o que tornou possível a melhora da confiabilidade através dos programas de PT&I (*Preventive Testing and Inspection*). Esta evolução gerou a necessidade de revisão das estratégias de manutenção para cada tipo de componente, ação esta normalmente instrumentada a partir de programas RCM.

3.3 A ANÁLISE RCM

A análise RCM cuidadosamente considera as seguintes questões:

- Qual é a função do sistema ou do equipamento em análise?
- Quais são as falhas funcionais que ocorrem com maior probabilidade?
- Quais são as prováveis consequências destas falhas funcionais?
- O que pode ser feito para que haja redução nas probabilidades de falha, ou das consequências sobre o sistema?

A Fig. 7 ilustra em linhas gerais a interface entre a metodologia RCM e o sistema/processo.

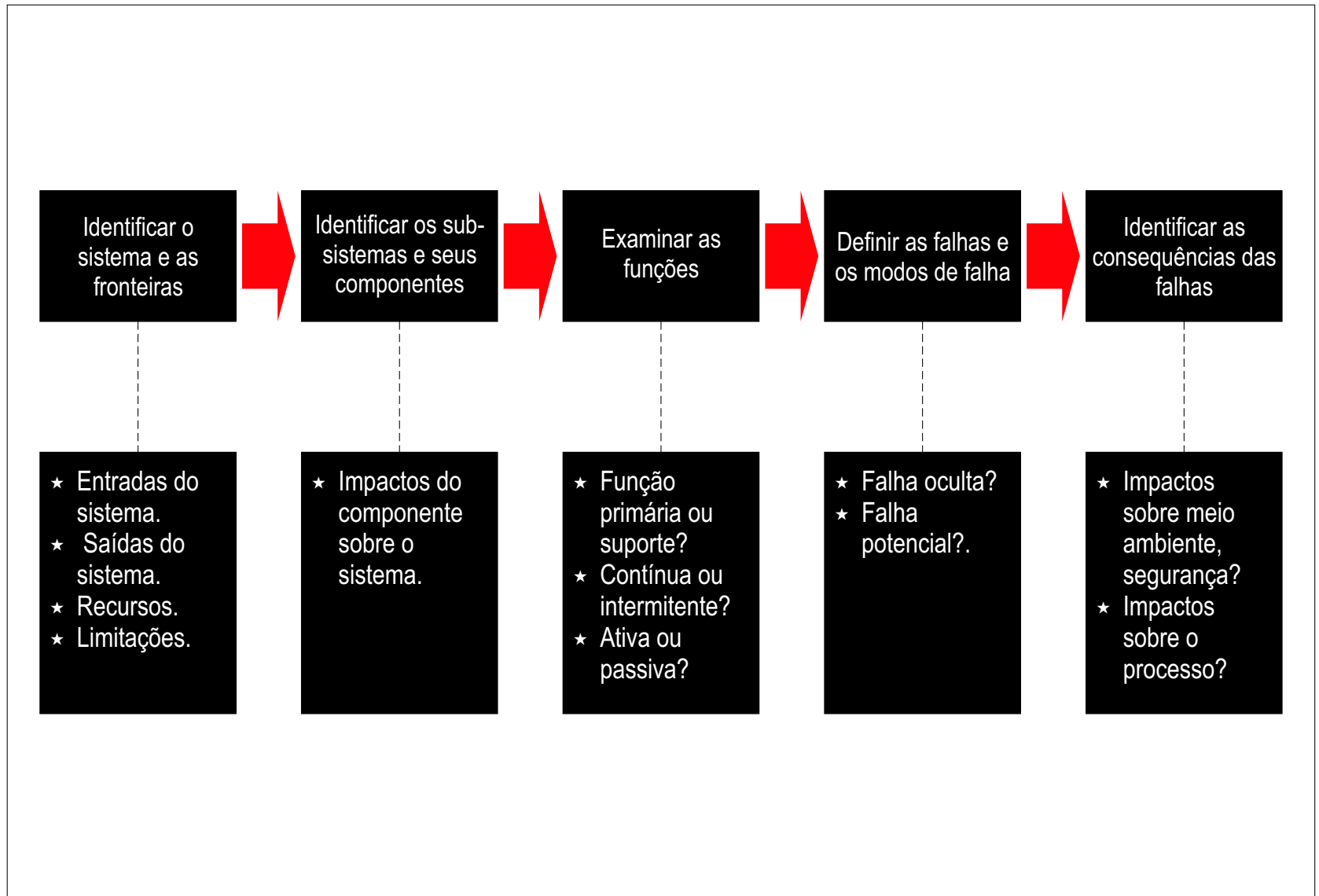


Figura 7: Análise de considerações em RCM.

3.3.1 DEFINIÇÃO DA ABRANGÊNCIA DAS ANÁLISES RCM

A metodologia RCM, em razão de sua razoável complexidade de aplicação, deve ser utilizada principalmente na análise de sistemas julgados críticos ao processo, seja por fatores que envolvam segurança, saúde ou meio ambiente (risco de explosões, lesões aos operadores, ou contaminações), seja por fatores econômicos (alto custo de reparação de componentes ou elevadas perdas para o processo), ou mesmo fatores que envolvam a disponibilidade operacional do sistema.

3.3.2 DEFINIÇÃO DOS TRABALHOS-PADRÃO DE MANUTENÇÃO

Deve ser observado que o processo de análise de manutenção através de RCM permite como ações de contenção para a ocorrência da falha somente 4 alternativas possíveis:

- Ações corretivas (*Run-to-Failure*).
- Ações baseadas em intervalos de tempo ou ciclos (*Time-Based Actions*).
- Ações baseadas em condições (*Condition-Based Actions*).
- Ações de re-projeto, *age exploration*, e/ou inclusão de redundâncias no sistema.

A seguir encontram-se detalhadas as definições de cada uma das ações previamente citadas:

Ações corretivas (*Run-to-Failure*): nenhuma ação de contenção sobre a falha pode ser tomada. Normalmente para estas situações não existem tecnologias de inspeção disponíveis para que se faça uma verificação das condições dos componentes atingidos pela falha.

Ações baseadas em intervalo de tempo ou ciclos (*Time-Based Actions*): ações de inspeção programadas a intervalos de tempo pré-definidos, estes normalmente baseados em conhecimento de parâmetros de confiabilidade observados dos históricos de falha dos componentes. Estas ações são somente programadas quando há total segurança de que existem pontos notáveis de degradação da função dos componentes, caso contrário tornam-se extremamente dispendiosas ao sistema de manutenção.

Ações baseadas em condições (*Condition-Based Actions*): normalmente denominadas inspeções preditivas, estas ações levam em consideração perturbações ao sistema notadas somente com a utilização de tecnologias particulares (p.e. análise termográfica, medição de vibração, análise de contaminantes, etc). São ações de contenção utilizadas para os modos de falha ditos aleatórios, e que não geram impressões visíveis de degradação aos componentes afetados.

Ações proativas: são ações utilizadas em situações onde não é possível a convivência com o risco de falha, e porém, não existam tecnologias disponíveis para a contenção do modo de falha gerador da falha. Normalmente

envolvem reprojeto do sistema, inclusão de redundâncias, ou a chamada *age exploration*^a.

A definição do tipo de estratégia a ser tomada para cada situação encontra-se ilustrada na Fig. 8.

^a*Age exploration* é a análise na qual são determinados os intervalos de manutenção mais efetivos visando a redução de custos com inspeções desnecessárias ou ineficientes. É denominada *age exploration* em razão de estar normalmente associada à identificação de intervalos de *overhaul* ou de descarte de componentes por término de vida útil, de modo que as ações de manutenção associadas a este tipo de análise devem então visar o prolongamento destes intervalos.

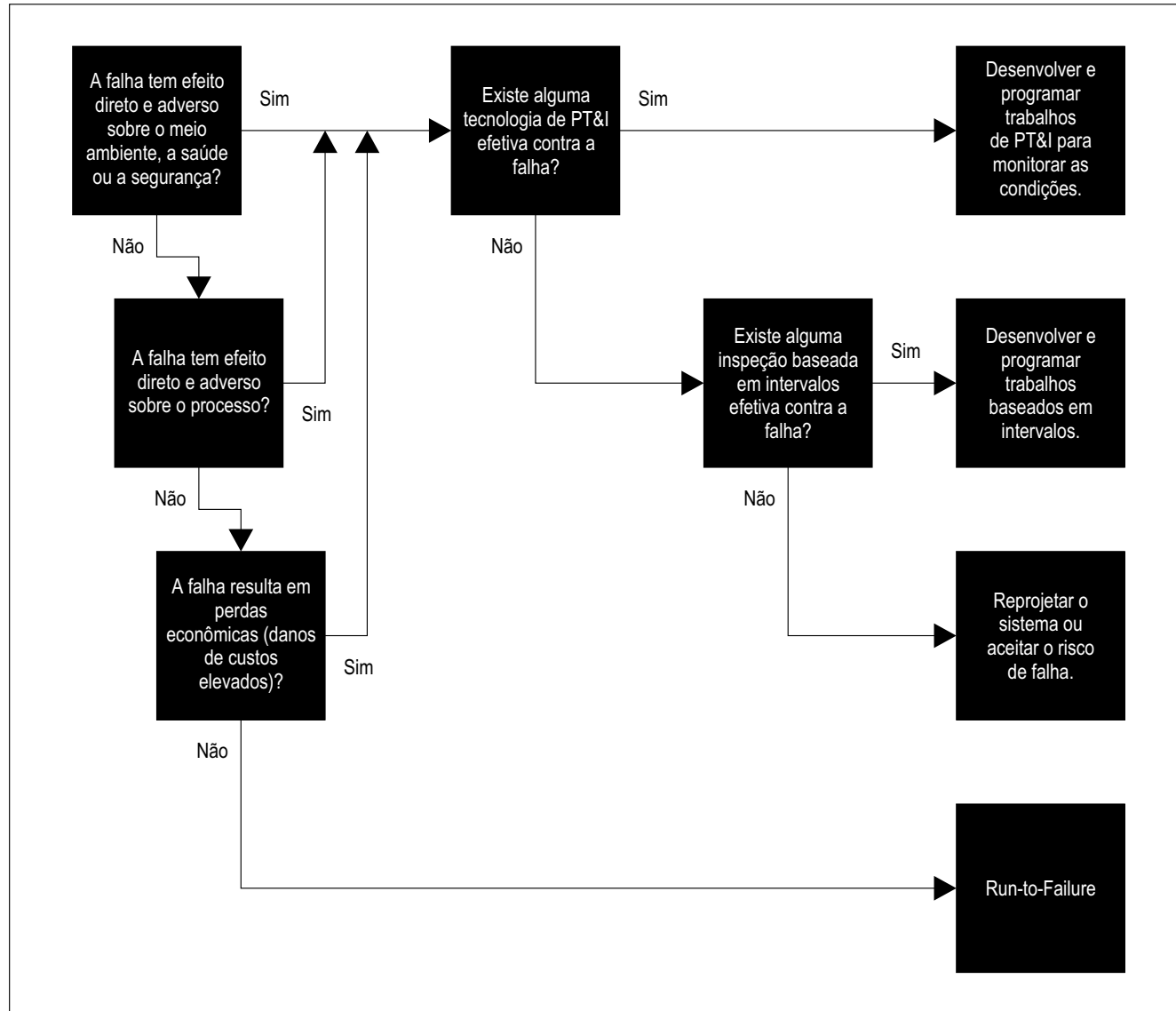


Figura 8: Análise do processo de manutenção.

3.4 PRINCÍPIOS DO RCM

Os princípios primários da análise RCM são:

1. **RCM é orientado para a função** - busca preservar a função do sistema ou do equipamento, não somente a operabilidade.
2. **RCM é focado no sistema** - mantém primeiramente a funcionalidade do sistema e não de um único elemento.
3. **RCM é centrado em confiabilidade** - busca conhecer as probabilidades de falha em períodos específicos da vida dos componentes.
4. **RCM é condicionado ao projeto** - tem como objetivo manter a confiabilidade inerente ao projeto atual do equipamento ou sistema (mudanças de performance são tarefas de engenharia de projetos e não da manutenção).
5. **RCM é dirigido para segurança e economia** - a segurança deve ser assegurada a qualquer custo. Se em determinada situação o custo é fator limitador para o atendimento da segurança, RCM deve alertar para alteração do projeto do sistema.
6. **RCM é orientado ao tratamento de qualquer condição insatisfatória** - considera como falha a perda de função de um equipamento (operação cessada) ou a perda de qualidade do processo (processo não conforme).
7. **RCM é baseado em três tipos de trabalhos de manutenção** - combina ações de manutenção baseadas em intervalos de tempo, ações baseadas em condições, e ações baseadas no tratamento de falhas potenciais

(proatividade) ou falhas ocultas. Emprega condicionalmente ações corretivas para determinados tipos de equipamentos.

8. **RCM é uma metodologia perpétua** - deve ser aplicado continuamente, de forma que seja possível a utilização de seus resultados como *feed back* na melhoria de novos projetos e da sistemática de manutenção.

3.5 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA RCM

3.5.1 DEFINIÇÃO DE FALHA

Falha é toda perda de função ou de performance de um equipamento. A análise RCM avalia as falhas sob diversos níveis: o nível do sistema, dos sub-sistemas, dos componentes, e em determinadas situações ao nível das peças.

O sucesso de uma organização eficiente de manutenção reside no asseguramento da performance requerida pelo sistema ao menor custo possível. Isto significa que os métodos de manutenção devem estar baseados sobretudo no claro entendimento das falhas que incidem sobre os diversos níveis do sistema.

3.5.2 DEFINIÇÃO DE MODO DE FALHA

Um *modo de falha* é definido como sendo toda e qualquer falha que seja inerente a um equipamento ou componente, e que resulte em uma perda funcional sobre um sistema ou um sub-sistema.

3.5.3 FMEA E RCM

FMEA é a metodologia de base da análise RCM. No decorrer da análise, a metodologia FMEA identifica cada função do sistema e suas falhas associadas. Em um nível mais aprofundado, identifica os modos de falha associados a cada uma destas falhas, examinando quais as consequências sobre o sistema.

Uma peculiaridade bastante relevante ao nível de sistema e que é geralmente observada na prática é a ampla possibilidade de existência de modos de falha múltiplos associados a uma mesma falha.

3.5.4 FORMULÁRIO E PADRÕES

A metodologia FMEA normalmente utiliza formulários padronizado para representação das informações. Na Fig. 9 encontra-se ilustrado um modelo de formulário proposto para análise ao nível do sistema.

A medida que a análise torna-se mais aprofundada são então utilizados os formulários a nível de sub-sistema (Fig. 10) e a nível de componente ou de partes do componente (Fig. 11), este último já diferenciado em razão da necessidade de detalhamento do mecanismo, das razões e das causas associadas a cada um dos modos de falha potencialmente avaliados.

<h2 style="text-align: center;">Análise RCM (sistema)</h2> <div style="background-color: black; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;"> Utilizar este formulário somente para análise ao nível de sistema. </div>		Setor de origem:				Data de elaboração:
		Nome do sistema:				
		Autor da análise:				
N° de controle	Nome & Função/ Performance requerida	Falha funcional	Modo de falha	Efeitos potenciais da falha	Ranking de criticidade	Probabilidade de ocorrência

Figura 9: Formulário padronizado para análise RCM ao nível de sistema.

Análise RCM (sub-sistema)		Setor de origem:		Data de elaboração:
Utilizar este formulário somente para análise ao nível de sub-sistema.		Nome do sub-sistema:		
		Autor da análise:		
N° de controle	Nome & Função/ Performance requerida	Falha funcional	Modo de falha	Fonte de falha

Figura 10: Formulário padronizado para análise RCM ao nível de sub-sistema.

<h2 style="text-align: center;">Análise RCM (componente)</h2> <div style="background-color: black; color: white; padding: 5px; text-align: center; font-weight: bold;"> Utilizar este formulário somente para análise ao nível de componente. </div>		Setor de origem:				Data de elaboração:
		Nome do componente:				
		Autor da análise:				
N° de controle	Modo de falha	Mecanismo de falha	Razão	Causa	Detecção	

Figura 11: Formulário padronizado para análise RCM ao nível de componente.

3.5.5 CRITICIDADE E PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DA FALHA

Deve-se notar no formulário ilustrado na Fig. 9 a presença de dois campos nomeados *criticidade* e *probabilidade de ocorrência da falha*.

Diante desta análise, o valor apontado no campo criticidade deve ser um indicativo de qual a importância da preservação da função para o sistema. Como modelo, encontram-se na Tabela 1 as descrições para 10 possíveis categorias de criticidades/severidade para um sistema, embora seja possível a expansão ou a contração deste número como forma de adaptação do processo às realidades do sistema para o qual se está aplicando a análise.

Do mesmo modo, os valores de probabilidade de ocorrência de falha normalmente estão associados a alguma forma de classificação, o que serve para que a análise seja padronizada e limitada (sob a ótica de não permitir suposições sobre o tema).

Atendendo a esta padronização, estão já estabelecidos alguns critérios de classificação para a probabilidade de ocorrência de falha no formato de tabelas (ver exemplo da Tabela 2 adaptada dos padrões de análise empregados na indústria automotiva).

Ranking	Efeito	Comentário
1	Nenhum	Nenhum motivo para esperar que a falha tenha qualquer efeito sobre segurança, saúde, meio ambiente ou sobre o processo.
2	Muito baixo	Pequena perturbação na execução da função. A restauração da função pode ser feita rapidamente. O sistema permanece em funcionamento.
3	Baixo	Pequena perturbação na execução da função. O tempo de restauração da função pode ser longo. Não são gerados atrasos/perdas ao processo.
4	Baixo a moderado	Moderada perturbação na execução da função. O tempo de restauração da função pode ser longo. Existe a possibilidade de serem gerados alguns atrasos/perdas ao processo.
5	Moderado	Moderada perturbação na execução da função. O tempo de restauração da função pode ser longo. As possibilidade de serem gerados atrasos/perdas ao processo é alta.
6	Moderado a alto	Moderada perturbação na execução da função. O tempo de restauração da função pode tornar-se significativo. São gerados atrasos/perdas ao processo.
7	Alto	Alta perturbação na execução da função. O tempo de restauração da função torna-se extenso. São gerados atrasos/perdas ao processo.
8	Muito alto	Alta perturbação na execução da função. O tempo de restauração da função torna-se extenso. O sistema não consegue executar sua função.
9	Risco	Riscos potenciais à segurança, à saúde ou ao meio ambiente. A falha ocorre normalmente após o surgimento de alertas.
10	Risco	Riscos potenciais à segurança, à saúde ou ao meio ambiente. A falha ocorre sem que haja o surgimento de alertas.

Tabela 1: Categorias de Criticidade/Severidade.

Ranking	Efeito	Comentário
1	1/10.000	Probabilidade remota de ocorrência da falha.
2	1/5.000	Baixa taxa de ocorrência de falha. Falha praticamente inexistente.
3	1/2.000	Baixa taxa de ocorrência de falha. Ocorrência de no máximo 1 falha a cada 2 anos.
4	1/1.000	Taxa de ocorrência de falha baixa à moderada. Ocorrência de uma falha por ano.
5	1/500	Taxa de ocorrência de falha moderada. Ocorrência de uma falha a cada trimestre.
6	1/200	Taxa de ocorrência de falha moderada à alta. Ocorrência de uma falha a cada mês.
7	1/100	Alta taxa de ocorrência de falha. Ocorrência de uma falha a cada semana.
8	1/50	Alta taxa de ocorrência de falha. Ocorrência de uma falha a cada dois dias.
9	1/20	Altíssima taxa da ocorrência de falha. Ocorrência de uma falha a cada dia.
10	1/10+	Altíssima taxa de ocorrência de falha. Ocorrência de uma ou mais falhas a cada dia.

Tabela 2: Categorias de probabilidade de ocorrência de falhas.

3.5.6 CAUSAS DE FALHAS

Uma vez que sejam entendidas as funções utilizadas no sistema e os modos de falha potenciais (Fig. 9), o próximo passo é a investigação das causas da falha, tarefa esta sem a qual não é possível a seleção de ações de manutenção aplicáveis e efetivas a contenção das falhas.

A análise RCM deve aprofundar-se até o nível máximo de atuação do processo de manutenção (sistemas, sub-sistemas, componentes ou mesmo partes destes componentes quando for o caso). Este nível em geral está restringido pela tecnologia de análise existente ou disponível ao processo de manutenção.

3.5.7 APLICAÇÃO PRÁTICA

Com base na teoria RCM pede-se:

1. Desenvolver um FMEA para o sistema ilustrado na Fig. 4 com base na análise funcional elaborada no exercício da Seção 2.3.1 - utilizar o formulário da Fig. 9.
2. Escolher um sub-sistema e analisar seus modos e fontes de falha potenciais - utilizar o formulário da Fig. 10.
3. Escolher um componente do sub-sistema detalhado no item acima e analisar os mecanismos, as razões, as causas, e as formas de detecção para os modos de falha listados - utilizar o formulário da Fig. 11.
4. Comentar como pode ser feita uma abordagem estruturada para a planificação das ações de manutenção com o auxílio dos indicadores de confiabilidade detalhados na Seção 2.2.

3.6 CONCLUSÃO SOBRE OS OBJETIVOS DO RCM

O objetivo principal do RCM é a identificação para cada sistema e equipamento que o compõe, dos modos de falha e de suas consequências sobre o desempenho das funções associadas, de modo a tornar possível a utilização de técnicas de manutenção eficientes em performance e em custos, visando a minimização dos riscos e impactos da falha sobre o sistema.

Outros objetivos específicos para a aplicação da metodologia listados por Nowlan e Heap^a são:

- Garantir os níveis de segurança e de confiabilidade inerentes ao sistema.
- Restaurar estes níveis quando forem notadas deteriorações de desempenho das funções.
- Obter informações suficientes para a melhoria dos projetos onde forem notados níveis de confiabilidade/segurança inadequados ao desempenho das funções.
- Atender a todos os objetivos anteriores com custo mínimo.

^aF. Stanley Nowlan and Howard F. Heap. *Reliability-Centered Maintenance*. United Airlines and Dolby Press, sponsored and published by the Office of Assistant Secretary of Defense, 1978

PARTE III

ANÁLISE DE CAUSAS FUNDAMENTAIS DE FALHA

4 INTRODUÇÃO A ANÁLISE DE CAUSAS FUNDAMENTAIS

A razão básica para a investigação e o registro de ocorrências de falha é a de permitir a identificação de ações corretivas adequadas e eficientes à prevenção da recorrência. Este trabalho deve ser um subsídio para as metodologias previamente abordadas nas Partes I e II.

Todos os processos de análise de causas fundamentais devem estar apoiados no cumprimento de 5 etapas denominadas:

1. Coleta de informações.
2. Avaliação.
3. Detalhamento de ações de contenção.
4. Documentação e aplicação prática de ações.
5. Acompanhamento das ações e correção de desvios.

O correto gerenciamento dos recursos a serem alocados durante cada uma das fases acima citadas é fundamental ao sucesso da análise e do pós-gerenciamento.

4.1 DEFINIÇÕES

Algumas definições úteis na investigação e análise de falhas são:

Evento - qualquer ocorrência em tempo real (p.e. a quebra de uma tubulação, a falha de uma válvula, uma perda de potência, etc) que tenha impacto sobre o desempenho do sistema avaliado.

Condição - qualquer estado que possa gerar impacto sobre o desempenho do sistema.

Causa - uma condição particular que resulta na ocorrência do evento.

Causa direta - a causa que diretamente faz com que ocorra o evento.

Causa contributiva - uma causa que isoladamente não resulta na ocorrência do evento, porém somada a outras causas contributivas ou diretas pode ampliar a potencialidade de ocorrência do mesmo.

Causa fundamental - a causa que, acaso corrigida/eliminada, previniria a recorrência do evento.

4.2 DETALHAMENTO DAS ETAPAS DE ANÁLISE

4.2.1 COLETA DE DADOS

Nesta etapa é fundamental que seja feita uma análise retrospectiva de todos os eventos e condições observados durante a ocorrência do problema. Isto permite que a análise posterior possa retratar com a maior fidelidade possível todos os detalhes observados.

Todos os esforços devem ser feitos para a conservação de evidências físicas dos fatos e uma vez coletados os dados, estes devem estar disponíveis de forma clara e se possível em ordem cronológica para todos os envolvidos na análise.

Dados importantes a serem coletados são:

- Atividades relacionadas com a ocorrência.
- O evento que iniciou o desencadeamento do problema.
- Equipamentos, softwares e outros recursos associados com a ocorrência.
- Modificações em procedimentos, formações, etc.
- Circunstâncias físicas que possam estar associadas ao problema.

4.2.2 AVALIAÇÃO.

A etapa de análise compreende entender e identificar os *fatores causais* originários ou contributórios para os eventos associados a ocorrência.

As categorias associadas a fatores causais mais observadas na prática são:

- Problemas em equipamentos/materiais.
- Erros procedimentais.
- Problemas de concepção.
- Deficiência de treinamento.
- Problemas de gerenciamento.
- Fenômenos externos ao processo.

Estas categorias foram cuidadosamente selecionadas a partir de estatísticas de eventos, de modo a minimizar dispersões nas análises e padronizar o direcionamento das ações de contenção.

Dentro da etapa de avaliação é necessária ainda a realização da escolha da metodologia de análise das causas fundamentais relacionadas a ocorrências. Dentre os diversos tipos de análise disponíveis, duas das mais utilizadas são:

- Análise dos *Por quês?*, e
- Análise de Eventos e Fatores Causais.

A orientação deste tópico será feita sobre a segunda metodologia em razão da facilidade de visualização entre eventos e fatores causais. A metodologia encontra-se detalhada na Seção 4.4.

4.2.3 DETALHAMENTO DE AÇÕES DE CONTENÇÃO

A análise das causas fundamentais permite a visualização de possibilidades de implantação de ações corretivas sobre os processos analisados, fator este que normalmente leva a melhoria de confiabilidade, segurança e em algumas situações, performance do sistema.

Algumas questões relevantes a serem respondidas através durante o desenvolvimento desta etapa são:

- As ações detalhadas são eficientes contra a recorrência do problema?
- As ações detalhadas são factíveis?
- As ações detalhadas permitem ao sistema cumprir sua funcionalidade?
- Existe a possibilidade de intridução de novos riscos ao sistema através da implementação destas ações?
- As ações são imediatamente apropriadas e efetivas?

O sucesso desta fase envolve gerenciamento e responsabilidade das pessoas alocadas na execução das ações.

4.2.4 DOCUMENTAÇÃO

Esta etapa compreende a documentação e divulgação de relatórios, procedimentos e práticas geradas no decorrer da análise.

Não necessariamente existe um padrão para esta divulgação, embora julgue-se adequado que sejam disponibilizadas aos envolvidos na resolução do problema o maior número de informações possível sobre o evento, fator este que torna evidente o motivo das ações tomadas, potencializando inclusive o cumprimento das mesmas.

4.2.5 ACOMPANHAMENTO DAS AÇÕES

O acompanhamento das ações de contenção é uma prática importante para a finalização do processo de análise das causas fundamentais, pois introduz a possibilidade de correção de eventuais fatores que não estejam gerando o efeito desejado sobre o sistema.

4.3 ANÁLISE DE EVENTOS E FATORES CAUSAIS

Esta metodologia é empregada normalmente na análise de problemas extensos, de causas complexas e que desencadeiam eventos em série. Consiste da ordenação dos eventos sucessivos observados durante a cronologia do problema (ver forma de representação de eventos e condições na Fig. 12) e da associação a estes eventos das condições momentâneas, diretamente originárias e/ou contributivas para sua existência.

Para a diagramação considera-se a hierarquização das causas segundo as classificações: direta, contributiva ou fundamental. As causas diretas estão no nível mais próximo do evento, unidos através de uma linha de associação (cheia). As causas contributivas devem estar ligados as causas diretas e por último as causas fundamentais (normalmente destacadas).

Condições que possam ter contribuído para o evento, mas que porém não foram comprovadas durante a fase de investigação da ocorrência, podem estar representadas, porém sem linhas de associação ao evento correspondente (contorno tracejado).

Esta forma de diagramação é uma representação gráfica dos eventos e condições conhecidas, provendo uma forma de organização dos dados, uma sumarização do processo de análise e uma mostra detalhada da sequência de fatos condições e atividades que originaram a ocorrência.

Um maior contato com a metodologia será obtido através da resolução da aplicação prática da seção seguinte.

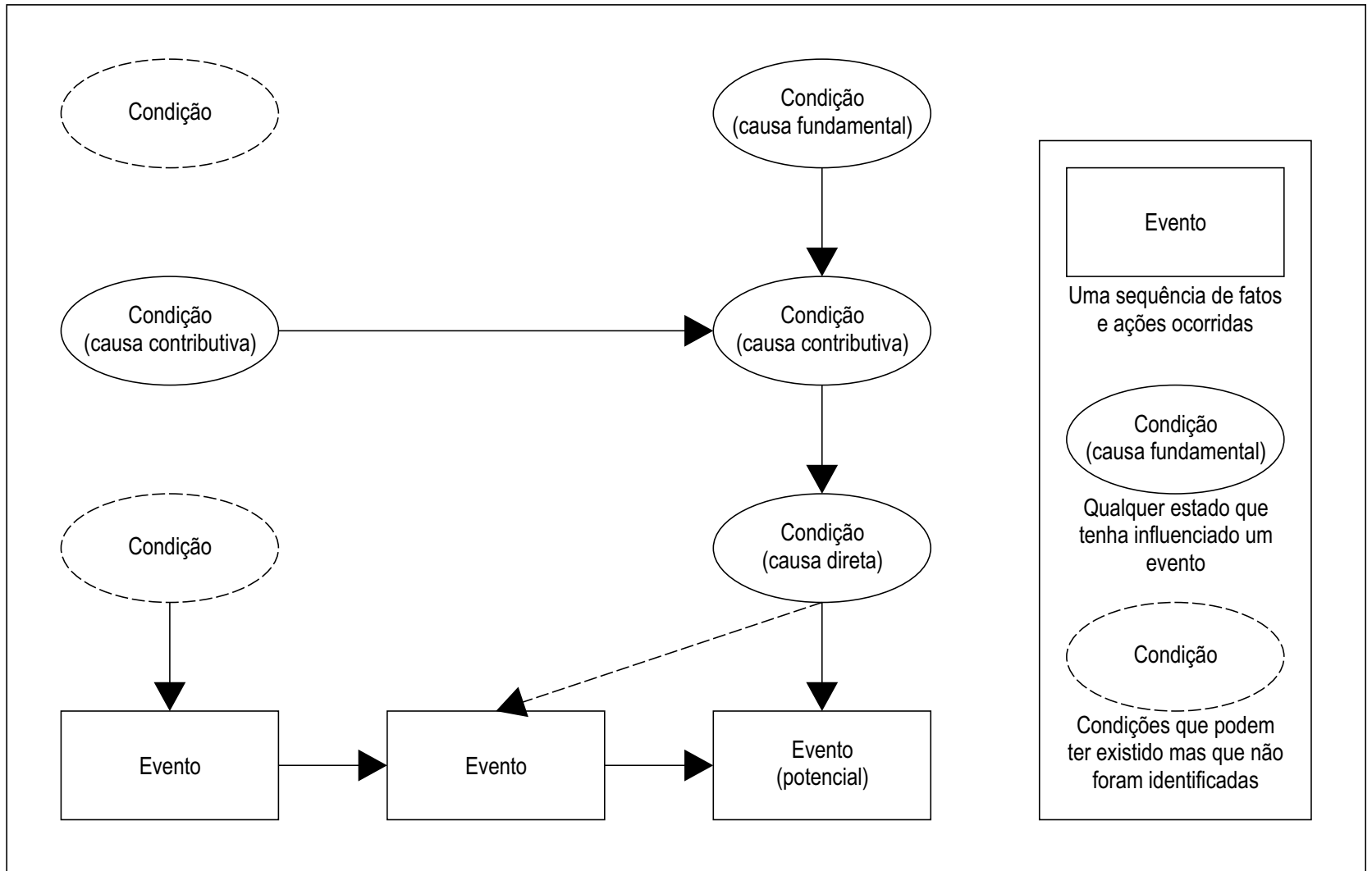


Figura 12: Diagramação de eventos e fatores causais.

4.4 APLICAÇÃO PRÁTICA

Determinar as causas diretas, as condições contributivas e a causa fundamental para o problema detalhado abaixo:

Um grande extrator de ar de 2.400-volt teve seu sistema de proteção acionado através do desarme de um fusível. O eletricista responsável no momento tomou um elemento de reposição do almoxarifado de peças, substituindo-o pelo que estava avariado. Após esta ação o sistema não voltou a funcionar, de modo que o eletricista então *by-passou* um elemento de segurança e conectou um medidor de tensão nas extremidades do fusível para verificar suas condições. Neste instante uma bola de fogo saltou do equipamento de medição, causando graves queimaduras sobre o eletricista, o que gerou 50 dias de hospitalização.

Algumas condições observadas após a análise estão abaixo detalhadas:

- No dia do acidente o eletricista responsável pelo equipamento estava afastado em razão de uma doença.
- O fusível retirado do almoxarifado estava fora de especificação (erro de identificação).
- Era conhecido que o extrator de ar não estava projetado para grande número de ciclagens e que regularmente vinha apresentando desarme do sistema de proteção.
- O supervisor da área conhecia o fato de que o eletricista substituto não estava preparado para a função, porém não deu nenhuma assistência durante a tentativa de resolução do problema.

... espaço para resolução ...