



**Universidade Federal do Paraná**  
**Programa de Pós-Graduação Lato Sensu**  
**Engenharia de Manutenção 4.0**



**MATHEUS BORGES BARRETO**

**CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE: AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO  
EM UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

**CURITIBA**

**2023**

**MATHEUS BORGES BARRETO**

**CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE: AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO  
EM UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

Monografia apresentada como resultado parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia de Manutenção 4.0. Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Mariano Pacholok

**CURITIBA**

**2023**

## RESUMO

A manutenção industrial é um assunto complexo, sendo tratado de diversas formas ao longo dos anos. O Plano de Confiabilidade engloba diversos aspectos para uma boa estruturação da rotina de operação e manutenção: projetos focados em confiabilidade e manutenibilidade, análise de falhas, manutenção centrada em confiabilidade, confiabilidade de sobressalentes, confiabilidade humana e manutenibilidade em infraestrutura. A metodologia foi avaliada em uma indústria de bebidas, pelo período de 12 meses, onde se buscou constatar se determinado aspecto do Plano de Confiabilidade estava satisfatoriamente implementado. Ao final do estudo, concluiu-se que a metodologia foi implantada parcialmente, com aspectos do Plano de Confiabilidade incorporados ao dia a dia da planta e outros aspectos pendentes de sua execução.

**Palavras-chave:** Manutenção industrial, plano de confiabilidade, manutenção centrada em confiabilidade, manutenibilidade.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>BREVE HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO</b>	<b>5</b>
1.1.	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	7
1.2.	OBJETIVO DO TRABALHO	7
<b>2.</b>	<b>INTRODUÇÃO AO PLANO DE CONFIABILIDADE</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>PROJETOS EM CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE</b>	<b>9</b>
<b>4.</b>	<b>A PRÁTICA DA ANÁLISE DE FALHAS</b>	<b>10</b>
<b>5.</b>	<b>MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE</b>	<b>11</b>
5.1.	DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES E PADRÕES DE DESEMPENHO	13
<b>5.1.1.</b>	<b>O contexto operacional e sua influência</b>	<b>14</b>
<b>5.1.2.</b>	<b>Os tipos de funções dos equipamentos</b>	<b>16</b>
5.2.	FALHA FUNCIONAL	17
5.3.	ANÁLISE DOS EFEITOS E MODOS DE FALHA	17
<b>5.3.1.</b>	<b>Capabilidade deteriora ao longo do tempo</b>	<b>18</b>
<b>5.3.2.</b>	<b>Aumento na performance esperada ao longo do tempo</b>	<b>19</b>
<b>5.3.3.</b>	<b>Falha de projeto</b>	<b>19</b>
<b>5.3.4.</b>	<b>Os efeitos da falha</b>	<b>19</b>
5.4.	AS CONSEQUÊNCIAS DA FALHA	20
5.5.	MANUTENÇÃO PROATIVA: TAREFAS PREVENTIVAS	20
5.6.	MANUTENÇÃO PROATIVA: TAREFAS PREDITIVAS	22
5.7.	DEMAIS TAREFAS: TAREFAS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS	24
5.8.	DEMAIS TAREFAS: OUTROS TIPOS	25
5.9.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONFIABILIDADE DE SOBRESSALENTES	25
5.10.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONFIABILIDADE HUMANA	26
5.11.	DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA E MANTENABILIDADE EM INFRAESTRUTURA	28
<b>6.</b>	<b>AVALIAÇÃO DO PLANO DE CONFIABILIDADE NA FÁBRICA DE BEBIDAS</b>	<b>29</b>
6.1.	CONSIDERAÇÕES SOBRE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE	29
6.2.	A PRÁTICA DA ANÁLISE DE FALHAS NA INDÚSTRIA	30
6.3.	APLICAÇÃO DO RCM NA INDÚSTRIA	30
<b>6.3.1.</b>	<b>Política de manutenção e tarefas do RCM</b>	<b>33</b>

6.4.	CONFIABILIDADE HUMANA DE SOBRESSALENTES NA FÁBRICA	35
6.5.	CONFABILIDADE HUMANA NA FÁBRICA	35
6.6.	DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA E MANTENABILIDADE EM INFRAESTRUTURA NA FÁBRICA	36
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>37</b>
7.1.	RESULTADOS ESPECÍFICOS DA APLICAÇÃO DO RCM	<b>38</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>40</b>

## 1. BREVE HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

Segundo Nunes (2015) e Moubray (1997), ao longo dos anos, observou-se um aumento na complexidade de diversos sistemas industriais, alterando-se a expectativa sobre a disciplina de manutenção no meio industrial. O aumento de complexidade deve-se, em primeira instância, ao aumento de quantidade e tipo de equipamentos industriais, novas técnicas de manutenção e novas visões surgindo no ramo.

A visão sobre manutenção ao longo dos anos também mudou, buscando atender às crescentes demandas do mercado por custos baixos e maiores lucratividades, bem como aos novos padrões de segurança, meio ambiente e disponibilidade. Assim, exige-se não só novas estratégias de manutenção, mas também times de manutenção muito mais capacitados, encarando os problemas através de novas maneiras de pensar.

A partir da década de 1930, a manutenção pode ser analisada a partir de três gerações. A primeira geração compreende o período até a Segunda Guerra Mundial, onde a globalização era quase inexistente e os equipamentos, superdimensionados em sua grande maioria. Assim, apenas tarefas básicas de reparo eram executadas e a relação entre produtividade e estratégia de manutenção não era explorada.

A transição para a segunda geração, compreende o período da Segunda Grande Guerra, onde a mão de obra disponível foi drasticamente diminuída e houve um grande aumento na dependência de máquinas para que a produtividade industrial se mantivesse nos patamares do período pré-guerra. Assim, a ideia de que falhas nos equipamentos ocorreriam e deviam ser evitadas ganhou força, levando ao desenvolvimento das metodologias de planejamento e controle da manutenção.

A terceira geração é marcada pela adoção, em grande parte do mundo industrializado, do sistema de produção *just in time*. Isso elevou a pressão por produtividade, uma vez que estoques cada vez menores eram exigidos. O crescimento da automação e da mecanização foi observado, levando ao acompanhamento de novos indicadores de qualidade na mesma medida em que o custo total de manutenção aumentou em termos absolutos e relativos. Nesse mesmo período, surge a metodologia RCC ou MCC, onde a confiabilidade dos equipamentos é o cerne da questão, considerando os mais diversos fatores para a construção de uma estratégia de manutenção sólida.

Na primeira geração de manutenção, acreditava-se que, se não todos, a maioria dos equipamentos e componentes teriam maior probabilidade de falha quanto mais fossem utilizados no dia a dia. Com o conceito de “mortalidade infantil”, advindo da segunda geração, a curva da banheira se tornou o principal modelo probabilístico de falhas em equipamentos. A figura 1 mostra os modelos de probabilidade de falhas das primeira e segunda gerações.

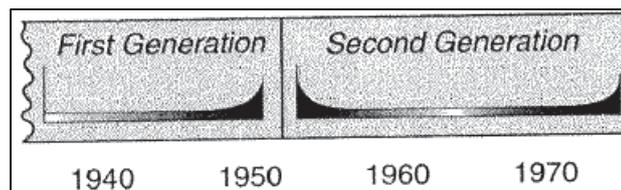


Figura 1. Curvas de falha.  
Fonte: MOUBRAY, 2015.

Com melhores técnicas e estudos em ascensão, a partir da década de 70 e com popularização a partir da década de 80, determinou-se não dois, mas seis padrões de falhas diferentes. Esse avanço se mostra contraintuitivo, pois a crença de que à medida que os equipamentos e subconjuntos envelhecem, seria de se esperar maior probabilidade de falhas. A figura 2 mostra os seis padrões discutidos a partir da terceira geração.

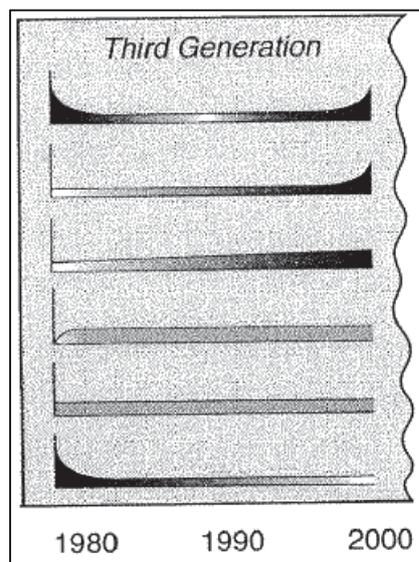


Figura 2. Os modelos de falha.  
Fonte: MOUBRAY, 2015.

Esses avanços no entendimento do surgimento das falhas, levou a vários programas de manutenção a partir da década de 80. Dentre eles, a popularização do

TPM (Total Productive Maintenance) e WCM (World Class Maintenance). De maneira geral, essas metodologias propunham um esforço de toda a unidade fabril em torno de melhorar a confiabilidade dos equipamentos, para que se pudesse produzir e, finalmente, utilizar toda a vida útil do equipamento. Uma das ferramentas contempladas nessas filosofias de manutenção, é o RCM, ou Manutenção Centrada em Confiabilidade.

### 1.1. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Ao entender brevemente o histórico de manutenção ao longo dos anos, e também perceber que o Brasil é um país que, ano após ano, tem a produtividade do setor industrial se reduzindo (CNI, 2021), é imprescindível que se busque maneiras mais eficientes de se produzir, para que a competitividade da empresa se mantenha ao longo dos anos.

Assim, o plano de confiabilidade se mostra como uma dessas ferramentas importantes, sempre visando manter ou aumentar o nível de produtividade, com confiabilidade e manutenibilidade adequadas. No fim, o que se busca, realmente, é uma diminuição ou diluição maior dos custos de produção através de uma manutenção confiável e adequada, refletindo em uma maior disponibilidade da planta fabril.

### 1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação da implementação do plano de confiabilidade na referida indústria de bebidas.

## 2. INTRODUÇÃO AO PLANO DE CONFIABILIDADE

O plano de confiabilidade é amplo e engloba diversos assuntos. Em uma planta fabril, deve ser executado em “parceria” com todos os colaboradores, desde o time operacional, passando pelo time técnico e culminando no time gerencial. Dessa maneira, este plano engloba seis pontos principais:

- 1) Projetos com foco em confiabilidade e manutenibilidade;
- 2) Análise de falhas;
- 3) Manutenção Centrada em Confiabilidade;

- 4) Confiabilidade de Sobressalentes;
- 5) Confiabilidade Humana; e
- 6) Documentação técnica e manutenibilidade em infraestrutura.

Na concepção de uma planta fabril, é possível e desejável que se tenha em mente os níveis almejados de confiabilidade e manutenibilidade operacional, desta maneira, efeitos positivos são esperados nos indicadores de MTBF e MTTR. Mas os conceitos não se limitam à fase de concepção, e podem e devem ser aplicados na fase operacional da planta, de tal maneira a sempre melhorar incluir ações na estratégia de manutenção que impactem positivamente a confiabilidade, bem como a manutenibilidade (STAPELBERG, 2009).

A prática da análise de falhas é recomendada para qualquer planta fabril, pois permite perceber e entender problemas crônicos na operação e manutenção que podem, inclusive, ter sua causa raiz na fase de projeto de uma planta fabril. Outros problemas que podem subir à superfície: problemas de fornecimento de materiais, peças inadequadas, alterações de projetos realizadas erroneamente, dentre outros aspectos a serem descobertos através das ferramentas de análise de falhas.

A metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade, busca atender à demanda do que deve ser feito em termos de manutenção para manter os níveis de confiabilidade aceitáveis de uma planta fabril. O método é aplicado tanto para plantas novas, quanto para plantas antigas e o resultado da é ter aplicado no dia a dia os planos preventivos, preditivos e prescritivos estritamente necessários para a boa operação fabril.

A confiabilidade em sobressalentes diz respeito ao capital empregado no estoque de peças para uma planta fabril. Certamente, é impossível que se mantenha todas as peças de reposição em estoque durante toda a vida útil de uma planta, e por isso, é necessário que se tenha níveis aceitáveis de estoque diariamente em uma planta fabril.

A confiabilidade humana, por outro lado, diz respeito à organização dos conhecimentos envolvidos na disciplina de manutenção: desde os conhecimentos de documentação técnica e normas, até práticas desenvolvidas pela experiência do time operacional e mantenedor. Daqui decorre, também, a importância do acervo técnico de uma planta, pois servirá tanto de apoio frente a uma grande falha, quanto de referência para a atualização dos planos de manutenção e sobressalentes.

Nos próximos capítulos, considerações serão dadas aos seis aspectos do Plano de Confiabilidade.

### **3. PROJETOS EM CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE**

Segundo a norma NBR 5462:1994, confiabilidade é definida como “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” e manutenibilidade, como “capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.

Esses conceitos, além de seus aspectos qualitativos, também são tratados quantitativamente através de modelos estatísticos, embora seja comum a quantificação através dos indicadores de manutenção. A confiabilidade está atrelada ao indicador MTBF (tempo médio entre falhas) e a manutenibilidade, ao indicador MTTR (tempo médio para reparo). Para o indicador MTBF, quanto maior os valores, melhor é a medida de confiabilidade de um sistema ou componente e para o MTTR, quanto menor, melhor é a reparabilidade de um sistema ou componente.

Assim, estes conceitos podem e devem ser trabalhados ao longo da vida útil de uma planta fabril, desde a sua concepção, até o seu dia a dia de operação. Já na fase de concepção de tal planta fabril, o conceito de “o que deve ser alcançado” deve ser alterado para “o que deve ser assegurado”, de tal forma que os requisitos de disponibilidade, confiabilidade, manutenibilidade e segurança desejadas para a planta sejam discutidas desde as etapas de concepção de projeto.

Assim, o conceito de confiabilidade na fase de concepção de projeto pode ser considerado como “a habilidade de um sistema performar suas funções dentro de limites especificados” (STAPELBERG, 2009), e isso pode ser delimitado considerando os mais diversos efeitos das falhas de cada variável de performance identificada como importante.

O conceito de manutenibilidade neste estágio de projeto, pode ser considerada como “uma quantificação da “reparabilidade” de um determinado equipamento ou sistema, o qual é geralmente estabelecido mediante manutenção corretiva”. Isso requer, que se considere outros aspectos práticos da manutenção, como a visibilidade, a acessibilidade e a reparabilidade de componentes e subsistemas de equipamentos

complexos. Outras variáveis a serem consideradas, são: “testabilidade” e “intercambiamento” de sobressalentes (STAPELBERG, 2009).

Em seguida, já na etapa operacional de uma planta fabril, deve-se implantar rotinas de análise de falhas e sua retroalimentação para a estratégia de manutenção e confiabilidade, alterando, onde preciso for, procedimentos operacionais e de manutenção, bem como especificando novos componentes, equipamentos e até mesmo treinamento para o time da fábrica.

Nisto, uma metodologia bastante utilizada recentemente é a *Manutenção Centrada em Confiabilidade* (RCM, em sua sigla inglesa). Nesta metodologia, todo um arcabouço de trabalho é definido para que se tenha a confiabilidade em primeiro lugar em uma planta. Dentro da metodologia, se bem aplicada, toda uma gama de atividades de manutenções proativas será implantada na fábrica, com o cuidado de também se considerar os tópicos de *confiabilidade humana e de sobressalentes* para cada equipamento crítico do processo.

#### 4. A PRÁTICA DA ANÁLISE DE FALHAS

Segundo Nunes (2015) e Affonso (2014), a análise de falhas quando bem implementada na rotina fabril, busca os seguintes objetivos:

- Aumentar a confiabilidade operacional;
- Reduzir os custos de manutenção; e
- Reduzir os riscos de acidentes, tanto ambientais quanto operacionais.

A investigação da falha busca entender e determinar as causas básicas que levam às falhas dos equipamentos. A partir desse entendimento básico, é possível determinar ações corretivas, preventivas ou mesmo preditivas que levem à mitigação das falhas e quando não há possibilidade desta, uma mitigação dos efeitos das falhas.

Várias técnicas podem ser implementadas para este fim de análise, e a profundidade é determinada com a importância e priorização das diversas falhas que ocorrem no dia a dia fabril. Quanto maior for o impacto de uma falha ou de sua consequência, maior será a prioridade para destinar recursos financeiros e humanos para sua correção.

No caso de falhas simples e não repetitivas, que não resultem em grandes perdas ou riscos de segurança físicos e ambientais, uma ferramenta bastante utilizada é a de *5 por quês*. Esta simples, mas efetiva ferramenta, serve para instigar a análise

mais aprofundada de uma falha, na medida em que se entende que no quinto por quê utilizado, provavelmente chegou-se na causa raiz desta falha e ações podem ser traçadas para que a falha não ocorra novamente.

No caso de falhas repetitivas, ou mesmo falhas com grande impacto ambiental, financeiro ou operacional, é recomendado a utilização de outras técnicas mais robustas para a análise, tais como: a análise dos modos e efeitos de falha (FMEA), a análise dos modos, efeitos e criticidade de falha (FMECA), análise de árvore de falha (FTA), análise de causa raiz (RCA), custo do ciclo de vida do equipamento (LCC) e análise de indicadores de manutenção, como o MTBF e o MTTR (NUNES, 2015; AFFONSO, 2014).

As ações definidas oriundas da utilização das ferramentas de análise de falhas devem ser incorporadas ao dia a dia fabril, para que a determinada falha não se repita. De maneira geral, as ferramentas de análise de falha são reativas, ou seja, são sempre acionadas após a falha. Mais adiante, métodos proativos são apresentados em maiores detalhes. É também importante destacar que os resultados das análises afetam o plano estratégico de manutenção, como *inputs* de uma análise mais aprofundada.

Dentre outras possibilidades, as ações mais comuns provenientes de análises de falha, são: padronização de componentes, modificação de procedimentos de operação, modificação de procedimentos de manutenção, modificação de projetos dos equipamentos e modificação de projeto de instalações. Cada uma dessas possibilidades, devem ser analisadas de modo a não afetar a operação de um sistema para pior.

A análise dos indicadores de manutenção como MTBF e MTTR devem também ser realizadas continuamente, de modo a se verificar que as ações não tiveram o impacto positivo desejado em confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos.

## **5. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE**

Segundo Moubray (1997), em sua obra *Reliability Centred Maintenance* (RCM), uma definição completa da metodologia seria: “processo utilizado para determinar o que precisa ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários determinaram como padrão, em qualquer contexto operacional”.

O processo é realizado à luz de sete perguntas principais, a saber:

- Quais são as funções e padrões de desempenho associados ao ativo no contexto operacional atual?
- Em quais maneiras o ativo pode falhar em relação às suas funções?
- O que causa cada falha funcional?
- O que acontece quando cada falha ocorre?
- Em quais maneiras cada falha importa?
- O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
- O que deve ser feito se tarefas proativas viáveis não puderem ser determinadas?

Para que se responda as sete perguntas realizadas pela metodologia, deve-se possuir na unidade fabril um sistema de tagging lógico por funções dos equipamentos. Atualmente, a maioria das plantas com a divisão de “planejamento e controle de manutenção”, já teria este passo concluído, servindo de base para o início da aplicação da metodologia.

Além disso, um grupo multi-funcional deve existir na unidade composto por profissionais de todas as áreas relacionadas ao ativo, não apenas por profissionais mais seniores. Portanto, um facilitador, um supervisor de engenharia e de operações, operadores, técnicos mecânicos e eletricitas e um especialista externo. É imperativo que o time multi-funcional tenha sido treinado no RCM e tenha encontros regulares.

Uma vez determinado o time, deve-se realizar um planejamento detalhado, considerando os equipamentos que mais beneficiariam a planta através do RCM, determinar os recursos necessários para instauração da metodologia, determinar os papéis e responsabilidades do time multi-funcional e, por último mas não menos importante, determinar claramente o contexto operacional dos equipamentos.

Se aplicado e auditado corretamente, a metodologia trará benefícios tangíveis e intangíveis à planta: maior integridade ambiental e de segurança, desempenho operacional melhorado, uma estratégia de manutenção com maior custo benefício, maior aproveitamento de vida útil dos ativos, um acervo e conhecimento técnico mais detalhado, maior motivação dos colaboradores e um melhor trabalho em equipe.

Nas próximas subseções, cada pergunta será detalhada e explicada em maiores detalhes.

## 5.1. DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES E PADRÕES DE DESEMPENHO

O assunto mais importante e mais dispendioso é a definição das funções e padrões de desempenho dos mais diversos tipos de equipamentos presentes em uma indústria (MOUBRAY, 1997). Estes aspectos se negligenciados ou mal determinados comprometerão a estratégia de manutenção de um certo ativo, ao passo que não “cobrirá” todos os seus modos potenciais de falha. Assim, este aspecto também representa uma mudança de paradigma em relação ao pensamento tradicional advindo da manutenção preventiva: a de que a ênfase está no que o usuário espera que o equipamento faça ao invés do que o equipamento foi construído para fazer.

A maneira ideal de se descrever uma função consiste em utilizar frases curtas, com verbo no infinitivo, objeto da frase e o padrão de desempenho esperado. No âmbito industrial, é de se esperar que ao longo dos anos desde o comissionamento da indústria, várias modificações em relação ao projeto inicial tenham sido feitas e esse fato dificulta definir o padrão esperado de desempenho de certos equipamentos. Essa tarefa se torna então, enriquecedora em termos de conhecimento para o time de RCM e a unidade como um todo.

Quanto mais específica for a frase de função e padrão de desempenho, mais claro é para se definir uma boa estratégia de manutenção. Deve-se, portanto, evitar frases qualitativas ao máximo, exceto em situações que o padrão de desempenho seja subjetivo, como por exemplo em situações de funções de pintura. Assim, definir uma frase quantitativa não é simples e direta em todas as situações, principalmente se o processo e/ou equipamento sofreu diversas modificações ao longo do seu ciclo de vida. Um bom exemplo de frase quantitativa seria: fornecer ar comprimido a pressão de 5 bar e a vazão de 1200 m<sup>3</sup>/h.

O padrão de desempenho possui duas definições, a saber: o desempenho esperado pelo usuário e o desempenho de projeto. O desempenho de projeto ou inicial é aquele que carrega as características construtivas originais do equipamento, sem nenhuma falha ou desgaste. À diferença entre o desempenho esperado e inicial, dá-se o nome de “margem para deterioração”. Essa margem é o parâmetro que garante que o equipamento conseguirá desempenhar sua função esperada ao longo de sua utilização e é também o motivo de um equipamento ser dito como passível de manutenção.

Ora, se um equipamento possui padrões de desempenho esperado maiores que os padrões iniciais ou de projeto, a manutenção nada pode fazer para colocá-lo a par do esperado, uma vez que essa situação configura um erro de projeto ou de dimensionamento. A figura 3 ilustra essa comparação.

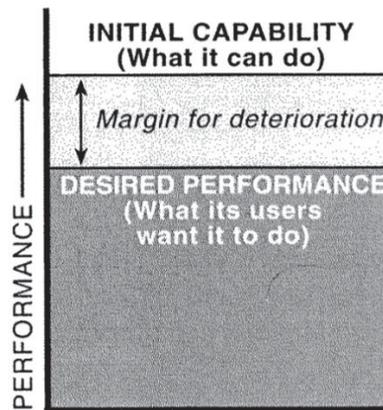


Figura 3. Desempenho inicial e esperado.

Fonte: MOUBRAY, 2015.

Nesta lógica, é possível delinear duas conclusões óbvias, mas de grande importância ao entendimento deste assunto:

- Para que o equipamento seja considerado com boa “manutenibilidade”, o desempenho esperado deve estar dentro das funcionalidades para qual o equipamento foi projetado e construído;

- Para determinar se isto é verdade, não basta somente saber a capacidade inicial do equipamento, mas também o padrão de desempenho mínimo que se espera dentro do contexto operacional ao qual o equipamento está inserido.

Se o padrão de desempenho esperado é tido além da capacidade inicial do equipamento, ele é dito como “erro de projeto” ou mesmo como “sem capacidade de manutenção”.

### 5.1.1. O contexto operacional e sua influência

O contexto operacional ao qual o equipamento está inserido é de vital importância para um bom desenho da estratégia de manutenção (MOUBRAY, 1997).

Ao todo, é entendido que doze tópicos são de maior influência na caracterização do contexto: se o processo de produção em questão é por batelada ou contínuo, redundância do equipamento ou seus subconjuntos, padrões de qualidade, meio ambiente e segurança, turno operacional da planta, estoque durante manufatura do produto, tempo de reparo, peças sobressalentes, demanda sazonal de mercado, disponibilidade sazonal de matéria-prima e documentação da determinação do contexto operacional.

A influência do modelo de processo contínuo ou por bateladas, se dá na interconexão de cada componente ou sub-componente dentro de um processo. Esta é a característica operacional mais importante de um equipamento, uma vez que a falha de um único equipamento em um processo contínuo leva à falha de todo o processo.

Dessa forma, a presença de equipamentos redundantes no processo ou mesmo de processos de produção alternativos impactará significativamente a robustez de uma estratégia de manutenção e as ações utilizadas para tal.

Os padrões de qualidade impactam a estratégia de manutenção na medida que equipamentos considerados construtivamente similares, podem ser exigidos de maneiras diferentes pela qualidade esperada. Assim, o impacto nas ações para cada um desses equipamentos torna-se evidente.

Um aspecto cada vez mais relevante para empresas e indústrias atualmente são os padrões ambientais, cada vez mais rígidos e exigentes. Assim, as considerações para que os equipamentos se mantenham em altos padrões de desempenho ambientais devem ser consideradas quando construindo uma estratégia de manutenção eficiente.

O risco de segurança de cada equipamento, bem como a sua facilidade de manutenção no dia a dia de uma indústria, também se mostra como aspecto decisivo na determinação de estratégia de manutenção eficazes, ou mesmo mudanças de projeto que facilitem ou alterem o fluxo de manutenção de determinados equipamentos.

O arranjo de turnos de uma fábrica também altera a estratégia de manutenção, na medida em que se os turnos são apenas oito horas diárias, a estratégia de manutenção será diferente se comparada a uma fábrica que opera por 24 horas por dia, todos os dias de uma semana. As considerações de sobressalentes e estratégias de parada de fábrica se tornam diferentes.

A presença de produtos inacabados em processo também afeta a estratégia de manutenção. Se durante a parada para manutenção é necessário drenar um

equipamento, ou mesmo aguardar que toda a planta tenha finalizado a produção. Isso impactará enormemente na robustez de manutenção de um determinado equipamento.

O tempo de reparo e também a presença de peças em estoque são considerações extremamente relevantes para uma estratégia de manutenção bem sucedida. Equipamentos com tempos de reparos mais altos, exigirão estratégias de manutenção mais robustas e, provavelmente, uma maior gama de peças sobressalentes no estoque da planta.

A presença ou não de sobressalentes no estoque de uma planta é extremamente importante por dois motivos: tanto do aspecto da mantenedibilidade e confiabilidade, quanto no aspecto financeiro de uma estratégia de manutenção. Afinal, peças em estoque representam capital represado à espera de utilização.

A demanda de mercado pelo produto produzido pela planta é também de suma importância na determinação da estratégia de manutenção, uma vez que, em estações ou épocas de demanda elevadas, uma falha simples poderá ter consequências muito maiores. Desta forma, a estratégia de manutenção é impactada de acordo.

Da mesma forma, algumas indústrias também sofrem alteração de ofertas de matérias-primas ao longo de um ano de produção. A estratégia de manutenção, evidentemente, deve levar em consideração essa situação, uma vez que a falha tomará proporções diferentes em cada caso.

Como último aspecto, mas nem por isso menos importante, faz-se necessário a documentação de todo este processo de descobrimento operacional dos equipamentos de uma planta. Evidentemente, este processo produz bons frutos para além de uma estratégia de manutenção, pois o time envolvido adquire visão holística nas mais diversas vertentes do dia a dia industrial.

### **5.1.2. Os tipos de funções dos equipamentos**

Cada equipamento que compõe o processo de produção de uma unidade fabril possui mais de uma função a ser desempenhada. Isso significa dizer que, se a estratégia de manutenção tem como objetivo manter o padrão de desempenho avaliado, todas as funções de um equipamento devem ser determinadas!

Este processo de definição de cada função do equipamento é uma tarefa bastante desafiadora e que consome bastante tempo. Principalmente em indústrias

mais antigas, onde a planta e o processo inicial já foram alterados diversas vezes, e em muitas situações, sem documentação alguma ou mesmo incompleta.

Assim, é importante a divisão das funções, principalmente, entre “primária” e “secundária”. Ao sub-dividir as funções de um equipamento nessas duas principais categorias, levando em consideração os 12 aspectos brevemente descritos na seção anterior, é possível adicionar robustez e maturidade a uma estratégia de manutenção.

De maneira breve, uma função primária é aquela para a qual o equipamento foi adquirido para executar diariamente, e uma função secundária é aquela em que pode se levar em consideração aspectos acessórios, mas nem por isso, menos importantes: impactos ambientais, segurança e risco, conforto operacional, aparência, proteção, eficiência, dentre outras características

## 5.2. FALHA FUNCIONAL

Um equipamento, ao não mais executar níveis de performance requeridos e definidos pelo usuário, é dito que está em estado de “falha”. Em outras palavras, a falha é definida como a incapacidade de qualquer ativo em realizar sua função. Dessa maneira, uma “falha funcional” é definida por Moubray (1997), como a “incapacidade de qualquer ativo de satisfazer aos seus padrões de desempenho que são aceitáveis ao usuário.”.

Nesta etapa, todas as falhas funcionais associadas com cada função do equipamento devem ser listadas e preparadas para as próximas etapas do RCM. Assim, ao definir-se as funções e os parâmetros de desempenho desejados dos equipamentos, também está se definindo os objetivos da manutenção para cada equipamento avaliado.

## 5.3. ANÁLISE DOS EFEITOS E MODOS DE FALHA

A partir da análise das funções dos equipamentos, passa-se agora a etapa de avaliação das causas dessas falhas (modos de falha), e de suas consequências (efeitos da falha). Assim, o modo de falha pode ser definido como um evento com grande possibilidade de levar um equipamento à sua falha.

A análise dos modos de falha é necessária, pois um equipamento pode ser levado a sua falha por diversos motivos. Para uma indústria inteira, esse número pode

ultrapassar milhares ou dezenas de milhares. A priori, é de se pensar que a atividade é hercúlea, mas uma manutenção *proativa* é aquela que se preocupa com os eventos antes mesmo de eles ocorrerem.

Assim, é comum dividir os modos de falha em três categorias: quando a capacidade inicial do equipamento regride abaixo do mínimo esperado de performance, quando a performance esperada do equipamento excede suas capacidades de projeto ao longo da vida útil, e por último erros de projeto, onde a performance esperada nunca é atingida, desde o comissionamento do equipamento.

### **5.3.1. Capacidade deteriora ao longo do tempo**

Nesta categoria, é comum encontrar os modos de falhas relacionados à deterioração natural, falhas de lubrificação, falhas por sujeira, falhas por desmontagem e erros humanos.

Falhas por deterioração natural são falhas causadas pelas cargas e tensões as quais os equipamentos estão submetidos naturalmente. Esse tipo de modo de falha inclui as falhas por fadiga, corrosão, abrasão, erosão, evaporação, insolação, dentre outros tipos de deterioração.

Falhas por lubrificação se manifestam em dois tipos: aquelas causadas por falta de lubrificação adequada, e aquelas causadas pela falha do próprio lubrificante. A falta de lubrificação adequada pode indicar que uma central de lubrificação para o equipamento pode ser a solução. Já as falhas associadas à falha do lubrificante em si, são relacionadas à oxidação, cisão das moléculas do lubrificante e depleção dos aditivos dos lubrificantes.

Falhas por sujeira ou poeira são comuns, e levam o equipamento a travarem ou a emperrarem. É também a principal causa das falhas relacionadas a uma boa aparência dos equipamentos, e ocasiona problemas de qualidade severos.

Equipamentos soldados, rebitados, ou unidos por parafusos e porcas estão sujeitos a falhas por fadiga, corrosão, ou mesmos por vibração. Nesses casos, uma falha por desmontagem são muito sérias e levarão componentes ou subconjuntos inteiros a se desprender do componente principal do equipamento.

Por fim, erros humanos, neste contexto, são aqueles onde operações manuais podem levar a falhas: como na operação manual de válvulas.

### 5.3.2. Aumento na performance esperada ao longo do tempo

Nesta categoria, o ativo poderá falhar de duas maneiras diferentes: quando a performance esperada sobe, até o momento em que o equipamento não desempenha mais sua função esperada; ou o aumento de carga ou tensão relacionadas ao aumento forçado do desempenho do equipamento leva a uma deterioração forçada que ocasiona a falha dele.

### 5.3.3. Falha de projeto

Esse tipo de falha ocorre quando um equipamento é comissionado para desempenhar um padrão que não pode ser atingido. Portanto, situações como esta na planta precisam ser listadas para posterior correção.

### 5.3.4. Os efeitos da falha

Consideração apropriada deve ser dada, para que não se confunda modo de falha com efeito de falha. Neste ponto, o quarto passo do RCM trata de se listar o *que* acontece quando cada modo de falha acontece. Portanto, os efeitos de falha descrevem o que acontece quando um modo de falha ocorre.

Assim, os efeitos da falha devem incluir informações suficientes, tais como:

- Quais as evidências que comprovam que a falha ocorreu?
- Como isso impacta na segurança e/ou no meio ambiente?
- Como isso impacta a produção e/ou operação?
- O que deve ser feito para restaurar o equipamento?

Para esta etapa, diversas fontes podem ser utilizadas para suportar a análise: fabricante ou vendedor do equipamento, listas genéricas dos modos de falha, exemplos de utilização de equipamentos semelhantes no mercado, histórico de manutenção da planta, profissionais que operam e realizam manutenção nos equipamentos.

#### 5.4. AS CONSEQUÊNCIAS DA FALHA

Nesta etapa, consideração é dada ao questionamento: “de quais maneiras cada falha importa?”. Claramente, cada vez que um ativo falha, a organização é impactada de alguma forma. Neste sentido, é preciso determinar a importância de determinada falha para a organização e, a depender do grau de severidade, implantar ações proativas para mitigar as consequências dessas falhas.

Assim, segundo Moubrey (1997), “uma tarefa proativa que valha a pena ser realizada, é aquela que lida de maneira bem-sucedida com a consequência da falha que busca mitigar”. Claramente, esta afirmação supõe que é possível antever ou prevenir as falhas, mas em algumas situações, isto simplesmente pode não ser tecnicamente viável.

No contexto, as falhas podem ser evidentes ou ocultas. As falhas evidentes são aquelas que inevitavelmente serão percebidas pelos operadores ou mantenedores em condições normais. As falhas ocultas, por outro lado, serão aquelas em que não se perceberá o momento de ocorrência da falha.

Para além disso, as consequências das falhas evidentes podem ser subdivididas em: consequências de segurança e ambientais, operacionais e não-operacionais.

As consequências de falhas ocultas, de maneira geral, estão relacionadas com os equipamentos de proteção desses ativos. Em essência, estes equipamentos de proteção garantem que as consequências das falhas ocultas serão menos sérias do que seriam se não houvesse proteção. E assim, nesta etapa, lista-se as consequências das falhas dos equipamentos de proteção para análise.

#### 5.5. MANUTENÇÃO PROATIVA: TAREFAS PREVENTIVAS

As ações que podem ser tomadas para lidar com a falha, podem ser categorizadas em dois tipos: tarefas proativas e ações padrões. As ações proativas são aquelas tomadas antes mesmo da ocorrência de uma falha, englobando as manutenções preditivas e preventivas. Já as ações padrões, são tidas como o “passo a passo” para retornar o equipamento à sua condição de operação uma vez que a falha

já ocorreu. Neste caso, entende-se que não há como se implantar ações de predição ou prevenção.

Qualquer equipamento desenvolvido para executar uma tarefa, está sujeito a uma gama de esforços e tensões decorrentes da execução dessas tarefas, deste modo, ao longo do tempo ou envelhecimento do equipamento, é comum e esperado que a resistência a esses esforços vá se reduzindo gradativamente até que uma falha ocorra. A relação entre tempo e deterioração é complexa e não poder se antecipada com certeza para todos os equipamentos.

Para construir uma estratégia de manutenção robusta, as duas ações preventivas podem ser escolhidas para estes casos: tarefas calendarizadas para restauração e tarefas calendarizadas para descarte.

A primeira consiste em remanufaturar um único componente ou mesmo planejar uma grande parada para um conjunto inteiro *antes* de um tempo especificado, independentemente das condições desses componentes e/ou conjuntos. Para se definir a periodicidade dessas atividades, utiliza-se dados ou conhecimento comum para quando o principal modo de falha começa a apresentar sinais de “envelhecimento”, ou seja, um alto aumento da probabilidade de falha destes itens.

A segunda consiste em realizar o descarte de certos componentes e/ou conjuntos a cada determinado período, independente da condição dos equipamentos e/ou conjuntos e anterior a um limite de tempo. A frequência para este tipo de atividade também é determinada por dados de manutenção ou conhecimento comum para quando o principal modo de falha apresenta um elevando aumento na probabilidade de falha.

Portanto, para ambas as atividades possíveis nestes casos, a viabilidade técnica é determinada por dois pontos principais:

- Deve haver uma data ou período a partir do qual o componente e/ou conjunto apresenta um aumento significativo da probabilidade de falha; e
- A maioria dos itens “sobrevivem” a este período.

Por outro lado, a maioria das falhas não segue a relação com o tempo de maneira linear. Na grande maioria dos casos, no dia a dia da operação de um equipamento, existem interações complexas de esforços e tensões, bem como conjuntos bastante complexos, com dezenas e até centenas de componentes. Tudo isso torna a predição da vida de um equipamento difícil de ser determinada com segurança.

## 5.6. MANUTENÇÃO PROATIVA: TAREFAS PREDITIVAS

Como a maioria dos modos de falha não apresentam um aumento na probabilidade de falha com o tempo que estão em serviço, é comum utilizar-se de métodos de monitoramento para descobrir o momento de início da falha. Dessa maneira, é possível propor ações factíveis para que se evite a falha ou suas consequências. A figura 4 abaixo ilustra o padrão da relação *condição versus tempo* esperado quando técnicas de monitoramento são empregadas.

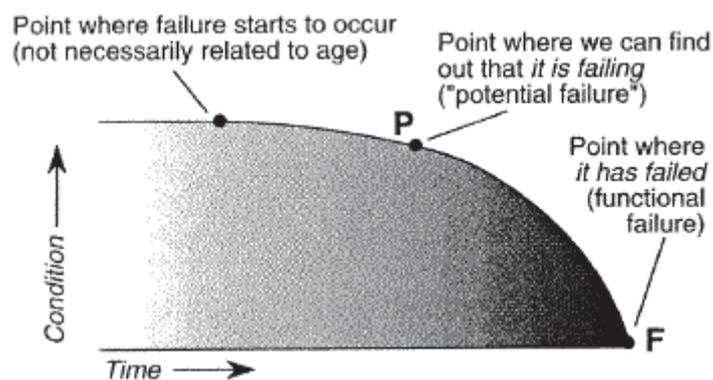


Figura 4. A curva P-F.  
Fonte: MOUBRAY, 2015.

A figura acima ilustra perfeitamente o ponto onde uma falha se inicia, até o momento em que pode ser detectada pela atividade de monitoramento de condição (Ponto "P"), até o seu ponto de falha, onde o componente e/ou conjunto não mais desempenhará sua função (Ponto "F"). Neste caso, a atividade de manutenção está monitorando o início de um potencial falha, que indica que uma falha funcional está ocorrendo ou vai ocorrer.

Para que essas atividades sejam tecnicamente viáveis, precisam considerar os seguintes aspectos:

- É possível determinar o início do potencial de falha; e
- É possível monitorar os componentes e/ou conjunto consistentemente, em intervalos suficientes para identificar o potencial de falha.

As categorias dos monitoramentos por condição podem ser divididas em quatro: monitoramento por condição, técnicas baseadas na qualidade do produto, monitoramento das variáveis de processo existentes e inspeção baseada nos sentidos humanos.

O monitoramento por condição é baseado na utilização de “sensores” que podem detectar efeitos dinâmicos, de partículas, químicos, físicos, de temperatura e elétricos na operação contínua do equipamento ou componentes que se deseje monitorar. O lado negativo desta opção, é que cada sensor detecta apenas um desses efeitos, ou seja, o custo de implantação para monitorar mais de um efeito, cresce proporcionalmente.

A variação na qualidade do produto é, na maioria das vezes, função de deterioração de um determinado componentes e/ou conjunto. Ou seja, quando uma máquina estatisticamente aumenta a probabilidade de se produzir um item não conforme, este é um indicativo muito forte de que um potencial de falha se iniciou no equipamento. Um método popular utilizado para monitorar esta situação, é o “Controle Estatístico de Processo”.

Efeitos primários como velocidade, vazão, pressão, temperatura, potência e corrente elétrica, são todas fontes de informação sobre a condição atual do equipamento, além disso, podem ser acompanhadas durante a operação normal do equipamento através da leitura de medidores já instalados no processo de produção. Aqui, os ensinamentos do “Kanban” e outros métodos são bastante úteis, pois a medição é facilitada em grande medida com marcações de cores nos medidores dos equipamentos.

Por fim, os sentidos humanos também servem em grande medida para acompanhar as condições de um equipamento. Visão, audição, tato e olfato devem e podem ser utilizados para inspecionar um equipamento, desde que:

- A periodicidade de checagem desta atividade seja mais alta do que os outros tipos de atividades, para aumentar a probabilidade de se encontrar um potencial de falha em seu início; e

- O processo é inerentemente subjetivo, dependente da observação e experiência de operadores e mantenedores dos equipamentos.

A melhor estratégia de manutenção é aquela que mistura diversos tipos de técnica de monitoramento, pois cada uma é indicada para um determinado intervalo de potencial de falha. Desta maneira, após a implantação do RCM, é esperado que não mais do que 20% dos modos de falha tenham tarefas de monitoramento atreladas a elas.

## 5.7. DEMAIS TAREFAS: TAREFAS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS

Quando tarefas de prevenção e predição não podem ser determinadas, seja por custo ou por viabilidade técnica, a tarefa a ser implementada para o componente e/ou conjunto deve ser determinada baseando-se nas consequências da falha, da seguinte maneira:

- Se uma atividade proativa não pode ser determinada para falhas ocultas, uma tarefa periódica de identificação de falha deve ser implementada;
- Se uma tarefa proativa não poder terminada para modos de falha que afetam segurança ou o meio ambiente, o componente e/ou subconjunto deve ser reprojetoado ou o processo deve ser alterado;
- Em casos em que haja consequências operacionais, a decisão de não-manutenção deve ser uma opção caso se justifique pelos custos;
- O mesmo pode ser dito para casos em que não existem consequências operacionais, mas que sejam justificadas pelo custo associado.

Nestes casos, tarefas em que apenas checa-se se uma determinada função do equipamento ainda está funcional são as chamadas “tarefas de identificação de falhas”. Este tipo de atividade apenas se aplica a falhas ocultas ou que ainda não se manifestaram. Espera-se que cerca de 40% de todos os modos de falha de um equipamento se encaixem na categoria de falhas ocultas.

A periodicidade do intervalo para esse tipo de atividade pode ser determinada através de uma abordagem mais rigorosa, levando em consideração a curva P-F, o MTBF do equipamento e a indisponibilidade do período. O método mais rigoroso nem sempre é justificado para a maior parte dos componentes, e por isso, é comum utilizar abordagens mais “informais”: através de uma visão geral do sistema em seu contexto operacional, define-se já o intervalo de inspeção diretamente.

Para que essas tarefas sejam viáveis, os seguintes pontos devem ser considerados:

- É possível realizar a inspeção;
- A tarefa não aumenta o risco de uma falha; e
- É possível executar a inspeção no intervalo requerido.

É importante ressaltar que este tipo de manutenção é aconselhável apenas para os casos em que tarefas preventivas e preditivas não puderam ser determinadas,

pois é uma hipótese inicial que os equipamentos terão tempo em falha neste tipo de atividade.

#### 5.8. DEMAIS TAREFAS: OUTROS TIPOS

Por último, ainda restam dois tipos de atividades que não se encaixam nas demais categorias: manutenção não calendarizada e reprojeto. Apenas se não há nenhum tipo de atividade proativa possível, e nem mesmo é viável colocar-se uma atividade de identificação das falhas ocultas, é aceitável descrever uma atividade de manutenção não-calendarizada.

O reprojeto é um tipo de tarefa aceitável nos casos de que um equipamento apresente um sério risco ambiental ou de segurança. As atividades de reprojeto podem ser tanto aquelas que mudam a especificação de um componente, adicionando novos itens, ou mesmo comprando um equipamento mais atualizado. O termo também é utilizado para aquelas atividades em que se alteram processos de produção, e até mesmo treinamento do time de operação e manutenção, por exemplo.

#### 5.9. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONFIABILIDADE DE SOBRESSALENTES

A confiabilidade sobre os sobressalentes é também assunto importante na manutenção. Em linhas gerais, o único motivo para se manter sobressalentes em estoque é para se evitar ou reduzir as consequências de uma falha. Dentro deste raciocínio, se um equipamento tem um tempo de reparo alto, devido ao tempo de entrega de uma peça ou componente, é entendível manter esta peça em estoque.

Por outro lado, quanto maior a quantidade de peças ou sobressalentes no estoque de uma planta, maior é também o capital empregado para manter o estoque em funcionamento e disponível. Por isso, é importante que se tenha o melhor balanço entre os impactos de se manter determinado sobressalente em estoque ou não.

De maneira geral, uma boa ideia para se tratar do gerenciamento de sobressalentes em uma planta é:

- Utilizar o RCM para desenvolver uma estratégia de manutenção, tomando como base inicial, os sobressalentes que já se encontram em estoque;
- Revisar os modos de falhas mais críticos, com base na necessidade e impactos de se manter os sobressalentes em estoque ou não.

A partir disso, uma boa estratégia de sobressalentes pode ser determinada com base na análise prévia já realizada no RCM, ou mesmo na utilização das diversas ferramentas de análise de falhas disponíveis.

#### 5.10. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONFIABILIDADE HUMANA

Segundo Moubray (1997), uma parcela considerável das falhas enfrentadas na operação de uma indústria se deve a erros considerados humanos. E, no contexto do RCM, deve-se analisá-los utilizando a metodologia FMEA (NUNES, 2015; ). As falhas podem ser agrupadas em quatro categorias: erros provenientes de fatores antropomórficos, de fatores sensitivos, fisiológicos e psicológicos.

Na prática, os três primeiros tipos de erros humanos podem ser apenas efeitos de erros de projetos em equipamentos e procedimentos mal descritos. Os erros psicológicos por sua vez, representam problemas mais difíceis de serem tratados e são divididos em duas categorias: erros não intencionais e intencionais. A figura 5 ilustra a categorização dos erros psicológicos.

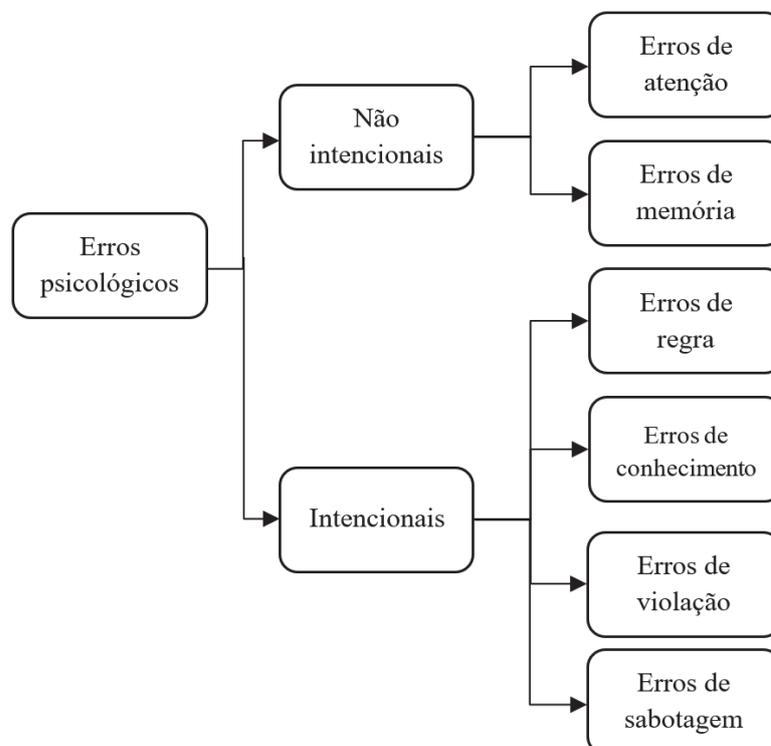


Figura 5. Os erros psicológicos.  
Fonte: Adaptado de MOUBRAY, 2015.

Erros não intencionais, de maneira geral, são conhecidos como erros de habilidade. Acontecem quando colaboradores capacitados e treinados não executam a tarefa apropriadamente. Os erros de atenção são caracterizados quando a atividade é realizada de maneira errônea, por exemplo, quando um técnico mecânico não ajusta corretamente a tolerância de montagem de um rolamento. Os erros de memória são caracterizados quando um passo importante da sequência de atividades não é realizado, como por exemplo, quando um técnico mecânico deixa uma chave de boca ao remontar a voluta de uma bomba.

Os erros de regra são caracterizados quando, mesmo seguindo o passo a passo descrito no procedimento, o resultado é a falha do sistema ou equipamento. Isso se deve, principalmente, a procedimentos mal determinados e mal definidos para a gama de situações em que a falha possa ocorrer. Erros de conhecimento acontecem em situações novas para os executantes das tarefas, cujos procedimentos e treinamentos não abrangeram. Assim, o executante deve tomar uma decisão e se não for a mais adequada, uma falha emergirá da situação.

Erros de violação e sabotagem ocorrem quando um colaborador decide infringir uma regra ou prejudicar o processo de maneira deliberada. Essas situações geralmente devem ser tratadas pela gerência da unidade, garantindo que todos saibam as regras e que suas violações terão consequências.

Percebe-se, então, que nem todas as falhas possuem sua causa-raiz na operação do colaborador, podem ter seu início em regras e procedimentos mal estabelecidos e em projetos de equipamentos e processos mal pensados e elaborados. Os erros humanos são tão constantes quanto as falhas por deterioração e devem ser considerados na análise FMEA, como um efeito da falha ou modo de falha, dependendo do seu contexto. Na prática, a melhor forma de lidar com erros humanos é envolvendo os operadores e time técnico na análise RCM e com treinamentos e procedimentos adequados.

Em se tratando de qualificação e certificação, existem diversos órgãos que oferecem cursos técnicos, dentre eles o conhecido SENAI. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), disponibiliza diversas normativas para qualificação e certificação profissional, dentre elas para metrologistas em calibração, caldeireiros, instrumentistas de manutenção, eletricitas de manutenção, dentre outras qualificações e certificações.

## 5.11. DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA E MANTENABILIDADE EM INFRAESTRUTURA

Durante a jornada de investigação da metodologia de RCM, a primeira fonte a ser normalmente consultada são os fabricantes e, por conseguinte, a documentação técnica fornecida pela empresa. Isso significa dizer que a premissa inicial, é a de que o fabricante conhece mais sobre as falhas e características dos equipamentos durante a sua vida útil.

Porém, na realidade, os fabricantes e suas documentações técnicas não possuem todas as informações necessárias por si só, uma vez que os fabricantes não acompanham o dia a dia operacional do equipamento e não dispõem de informações completas de falhas repetitivas ou grandes falhas.

Assim, a documentação técnica dos fabricantes possui informações importantes sobre sobressalentes e frequência de manutenção, mas em nenhuma hipótese devem ser levadas como verdades absolutas, devendo ser criticadas ativamente pelo time que está conduzindo a metodologia de RCM na planta.

Por outro lado, a manutenibilidade em infraestrutura diz respeito à infraestrutura necessária pelos operadores e mantenedores para executar os serviços da maneira mais segura e rápida possível. Neste sentido, ferramentas em bom estado de conservação e de prontidão quando necessário impactam positivamente o tempo de resposta a situações não previstas. O inverso também é verdadeiro, e pode causar acidentes e perdas financeiras para uma planta. Assim, durante o RCM, o time também deve observar:

- Estações de trabalho operacionais em bom estado de conservação;
- Estações de trabalho devem estar próximas dos equipamentos críticos de cada área;
- Oficina mecânica, elétrica e eletrônica bem equipadas e adequadas;
- Ferramentas comuns em bom estado de conservação e para cada mantenedor e operador;
- Preocupações com ergonomia para realização de manutenções em áreas de difícil acesso;
- Alterações de projeto ou compra de equipamentos específicos para cada tipo de manutenção;
- Dentre outros aspectos que facilitem a execução das rotinas de manutenção e operação.

Caberá ao time a avaliação e priorização desses aspectos, sendo evidente que nem todas as alternativas serão viáveis e impactantes no dia a dia da fábrica.

## **6. AVALIAÇÃO DO PLANO DE CONFIABILIDADE NA FÁBRICA DE BEBIDAS**

Em janeiro de 2021, em uma unidade produtora de bebidas, todo o escopo do plano de confiabilidade, englobando a aplicação da metodologia RCM foi aplicada com a intenção de se melhorar o nível de confiabilidade da planta fabril. Assim, a equipe de trabalho com quatro profissionais foi formada: um técnico mecânico, um técnico eletroeletrônico, um analista técnico de planejamento e um supervisor.

### **6.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE**

Os conceitos destas duas variáveis foram discutidos em certa extensão nos capítulos anteriores deste trabalho, e, durante o desenvolvimento das atividades da equipe durante o ano de 2021, os mesmos conceitos foram aplicados na avaliação dos planos de manutenção existentes para os equipamentos da planta fabril.

A planta em questão data da década de 1970 e, ao longo de todos esses anos, sofreu mudanças muitas vezes não planejadas. Pior ainda: as mudanças não levaram em consideração os conceitos tratados neste trabalho. O que se tem atualmente, são conjuntos de ações que foram tomadas no passado, impactando a confiabilidade e manutenibilidade do presente. Este fato apenas ressalta a necessidade de se ter um grupo de trabalho focado nessas questões.

Dessa maneira, um relatório completo com todos os planos ativos e aplicados da planta foi analisado, levando em consideração estes dois conceitos, bem como as análises de falhas recorrentes e de grandes falhas presentes no histórico de manutenção, de análise de *5 porquês* e de relatos de grandes falhas. Com essas informações e conceitos em mente, a avaliação inicial da criticidade dos equipamentos foi feita seguindo os seguintes critérios:

- Impacto em saúde e segurança;
- Impacto na capacidade produtiva da planta;
- Impacto na qualidade do produto;
- Impacto em custo fabril;
- Redundância do equipamento no processo;

- Grau anual de utilização do equipamento;
- Frequência de falhas e MTBF; e
- Tempo médio de reparo e MTTR.

De posse dos índices de criticidade de cada equipamento, analisou-se os relatórios de análises de falha, as funções e modos de falha de cada equipamento, bem como toda a metodologia RCM em extensão durante o ano de trabalho.

## 6.2. A PRÁTICA DA ANÁLISE DE FALHAS NA INDÚSTRIA

Conforme discutido anteriormente, os resultados das análises de falha para uma indústria, são de grande importância para a confiabilidade de uma planta. A metodologia dos *5 por quês* e o *Relato de Anomalia*, utilizado para falhas de grande impacto, já eram rotinas aplicadas no dia a dia, da seguinte forma: todas as manhãs os supervisores, operadores e mantenedores líderes se reuniam para discutir as falhas que haviam ocorrido no dia anterior.

Esta análise contínua dia após dia, possibilitava entender quais falhas eram pontuais e quais falhas eram repetitivas. Ações, então, eram tomadas no âmbito de se alterar planos de manutenção, planos operacionais, peças em estoque, procedimentos errôneos e, até mesmo, em alguns casos, a mudança de um projeto ou disposição de uma máquina. Dessa forma, durante o período de trabalho, buscou-se fortalecer a prática cada vez mais ao longo dos dias.

## 6.3. APLICAÇÃO DO RCM NA INDÚSTRIA

De acordo com a norma SAE JA1011, para que as sete questões da metodologia sejam satisfatoriamente respondidas, deve-se, primeiramente, determinar as funções do equipamento, as falhas funcionais possíveis, os modos de falha, os efeitos da falha, as consequências das falhas, a política de gerenciamento dessas falhas, determinação das tarefas, determina que o processo de RCM seja contínuo e que quaisquer formulações matemáticas sejam consistentes. Neste trabalho, será ilustrado a aplicação da metodologia em um único equipamento: o compressor de refrigeração por amônia.

A figura 6, abaixo exemplifica o trabalho realizado para definir as funções e subfunções de um determinado sistema de compressão de vapor utilizado para

refrigeração na unidade. Além disso, devido ao completo acervo técnico do equipamento na planta, foram utilizadas diversas informações e desenhos técnicos do equipamento para ilustração dos procedimentos dos planos de manutenção.

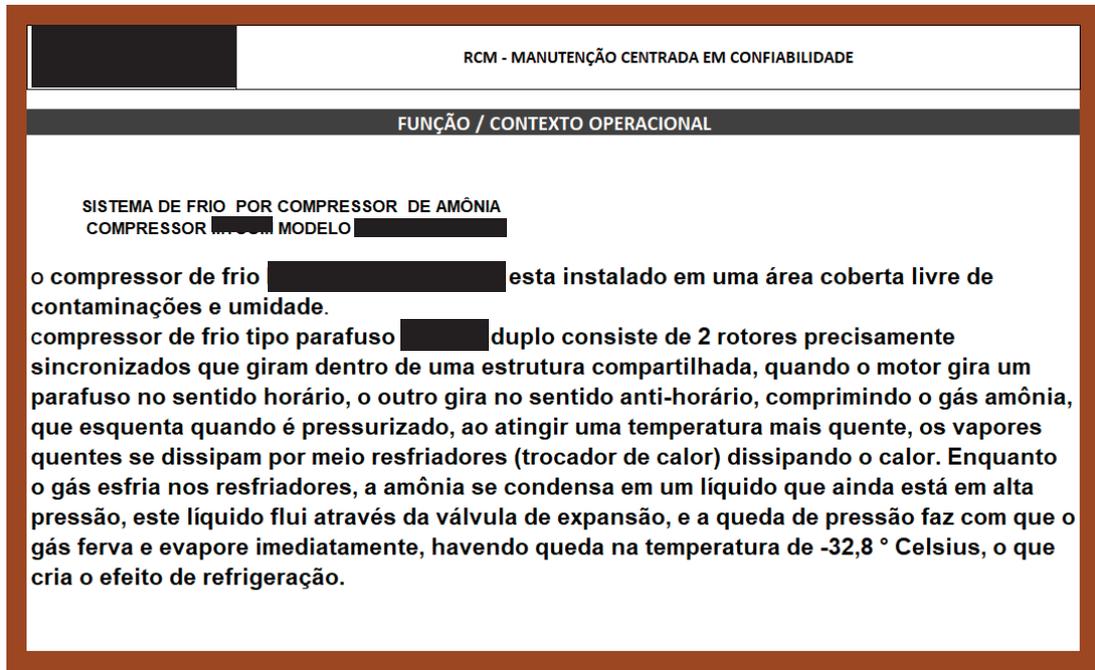


Figura 6. Exemplo de caracterização da função de um equipamento.  
Fonte: O autor.

A figura 7 ilustra a divisão do sistema de frio em seus subconjuntos funcionais.

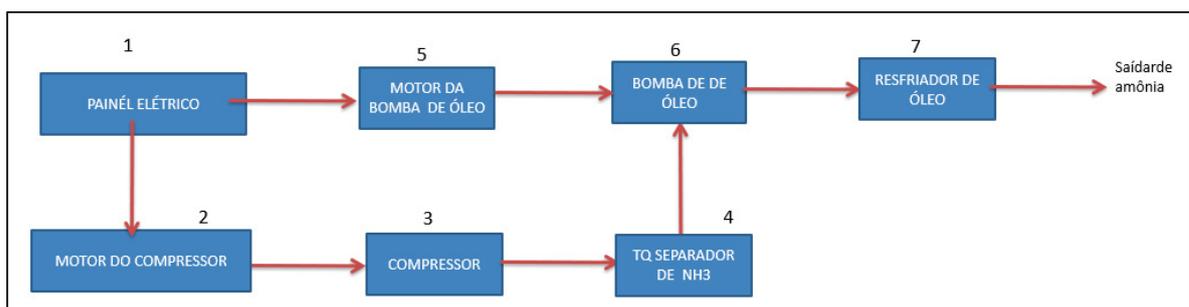


Figura 7. Sistema de frio e seus subconjuntos funcionais.  
Fonte: O autor.

Cada uma das subfunções foi caracterizada da seguinte maneira, como ilustrado pela figura 8.

4 SEPARADOR DE ÓLEO E AMÔNIA



O separador de NH<sub>3</sub> é responsável por remover com eficácia o óleo do gás de descarga do compressor e retorna o óleo para o cárter do compressor através de uma válvula boia de alta precisão, ou para um sistema de controle de óleo

Figura 8. Exemplo de caracterização de um subconjunto.  
Fonte: O autor.

A caracterização dos modos de falha dentro deste subconjunto, foi realizada da seguinte maneira, conforme ilustrado pela figura 9.

SUBSISTEMA (BLOCO)	MODO DE FALHA DE DETERIORAÇÃO NATURAL	EFEITO E CONSEQUÊNCIA DA FALHA
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	*Inclusão *Rompimento	Impedir fluxo normal da água gerando aquecimento do óleo ou passagem de impurezas causando incrustações e aquecendo o óleo.
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	*Aquecimento *Desgaste dos componentes internos	Obstruir passagem de óleo ou passagem de impurezas ocasionando queda de pressão da bomba e parada do compressor
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	*Aquecimento *Desgaste dos componentes internos	Obstruir passagem de óleo ou passagem de impurezas ocasionando queda de pressão da bomba e parada do compressor
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	*Inclusão *Rompimento	*Obstrução de passagem de óleo ou mistura de óleo com água, ocasionando aquecimento, travamento e quebra do compressor
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	*Inclusão *Rompimento	*Obstrução de passagem de óleo ou mistura de óleo com água, ocasionando aquecimento, travamento e quebra do compressor
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	*Inclusão *Rompimento	*Obstrução de passagem de óleo ou mistura de óleo com água, ocasionando aquecimento, travamento e quebra do compressor
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	Desgastes Oxidação	Rompimento do vaso de pressão ou vazamento não atingindo a pressão parando a linha de produção
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	Desgastes Oxidação	Rompimento do vaso de pressão ou vazamento não atingindo a pressão parando a linha de produção
SISTEMA DE SEPARAÇÃO FILTRAÇÃO E RESFRIAMENTO DE ÓLEO	Desgastes Oxidação	Rompimento do vaso de pressão ou vazamento não atingindo a pressão parando a linha de produção

Figura 9. Determinação das falhas funcionais e suas consequências.  
Fonte: O autor.

Em seguida, uma avaliação para determinar a importância de cada falha foi realizada, conforme figura 10.

SEVERIDADE	OCORRÊNCIA	DETECÇÃO	TOTAL
3	5	5	75
3	5	5	75
3	5	5	75
3	5	5	75
3	5	5	75
3	5	5	75
10	3	5	150
10	3	5	150
10	3	5	150

Figura 10. Caracterização da importância da falha.  
Fonte: O autor.

### 6.3.1. Política de manutenção e tarefas do RCM

A política de manutenção da empresa em questão foi extensamente transmitida através dos treinamentos iniciais e acompanhamentos da evolução da aplicação da ferramenta realizados mensalmente. As tarefas do RCM foram definidas com base na importância de cada falha, avaliação de sua causa raiz e se seria evidente ou oculta. As tarefas foram classificadas conforme a tabela 1:

Tabela 1. Classificação das tarefas de manutenção utilizadas.  
Fonte: O autor.

Tipo de tarefa RCM	Tipo de tarefa de manutenção
Tarefas de investigação	Limpeza ou Inspeção Operacional
	Limpeza ou Inspeção Técnica
	Inspeção preventiva com parâmetros
Tarefas de descarte	Lubrificação
	Trocas obrigatórias
	Reformas no equipamento
Tarefas por condição	Preditivas

Assim, a figura 11 ilustra as tarefas aplicadas para cada modo de falha.

LIMPEZA / INSPEÇÃO <1 mês	LUBRIFICAÇÃO	INSPEÇÃO COM PARÂMETRO	INSPEÇÃO PREVENTIVA	INSPEÇÃO PREDITIVA	LUBRIFICAÇÃO > 1 MÊS	LIMPEZA / INSPEÇÃO >1 mês	TROCA MANDATÓRIA	TROCA MANDATÓRIA OH	CALIBRAÇÃO	TESTE (Para Falhas Ocultas)
SIM										
SIM										
SIM										
			SIM							
			SIM							
						SIM				
SIM										
			SIM							
			SIM							

Figura 11. Tipos de tarefas para cada modo de falha.

Fonte: O autor.

Para cada atividade, definiu-se a periodicidade e executantes com base em informações de fabricantes, experiência da equipe técnica da unidade e histórico de manutenção disponível. A figura 12 ilustra o resultado deste procedimento.

PERIODICIDAD E (CURVA PF) Inspeção: DIAS	PERIODICIDADE (CURVA PF) Inspeção: HORAS	TEMPO DE EXECUÇÃO (MIN)	EXECUTANTE
30		60	OPE
30		30	OPE
30		30	OPE
	P6A-Seis Anos_EN	120	EXT
	P3A-Três Anos_EN	120	EXT
	4.320	300	OPE
30		30	OPE
	P6A-Seis Anos_EN	120	EXT
	P3A-Três Anos_EN	120	EXT

Figura 12. Definição de periodicidade e executante.

Fonte: O autor.

#### 6.4. CONFIABILIDADE DE SOBRESSALENTES NA FÁBRICA

Neste contexto, a confiabilidade de sobressalentes foi tratada, levando em consideração a valorização de cada plano de manutenção aplicado no equipamento. A figura 13 abaixo ilustra um exemplo de plano de manutenção avaliado com base em suas peças de reposição:

PEÇAS PARA MANUTENÇÃO DE 10.00 H DE OPERAÇÃO						
Cod. Sap	Nº do item	quantidade	Unidade	Nome do produto	EQUIPAMENTO	Valor atualizado 23/12/2021
50068801	117354013	2,00	PC	ELEMENTO FILTRANTE COALESCER MOD. STD,OPEN ENDS9.4X34 POL.	COMPRESSOR	R\$ 1.902,59
50297213	103354011	2,00	PC	ELEMENTO FILTRANTE MOD. EFO 300 - APB-002	COMPRESSOR	R\$ 1.076,68
50072251	103954063	1,00	PC	VALVULA SOLENOIDE 4 VIAS MOD. SS-G01-C5R-C230-E31 TENSAO 220	COMPRESSOR	
50119994	203506058	1,00	UN	KIT;P/BOMBA DE OLEO M 50P;;203506058 MYC	BOMBA DE ÓLEO	R\$ 4.078,73
50325440	107506065	1,00	UN	KIT DE ACOPLAMENTO D3	COMPRESSOR	R\$ 119,31
50043222	103354032	1,00	UN	ELEMENTO FILTRANTE MOD. FSS 250	COMPRESSOR	R\$ 820,34
50300561	107501020	1,00	PC	JUNTA 1/16 X DN EXT. 196 X DN INT. 170 - F FSS 250 (NA 1002)	COMPRESSOR	R\$ 21,55
50300560	107501032	1,00	PC	JUNTA 1/16 X DN EXT. 388 X DN INT. 362 - T (NA 1002)	COMPRESSOR	R\$ 132,59
50230308	107501012	2,00	PC	JUNTA 1/16 X DN EXT. 127 X DN INT. 115 - FILTRO DE ÓLEO	COMPRESSOR	R\$ 12,74

Figura 13. Avaliação dos sobressalentes para determinado plano de manutenção

Fonte: O autor.

O mesmo procedimento foi aplicado para todo e qualquer plano que designe trocas periódicas nos equipamentos. Nesta etapa, o histórico das análises de falhas que haviam sido realizadas até então foram apuradas, verificadas e, em certos casos, também utilizados para se entender a criticidade na valorização dos planos de manutenção ou não.

O almoxarifado, onde as peças ficam em estoque, também foi incluído na análise. Com base nos novos planos endereçados e valorizados, a inclusão ou exclusão dos materiais em estoque foi realizada. As peças foram divididas em níveis de criticidade, o que impacta na reposição de estoque, em se falando de *lead time*. Por último, a harmonia e conhecimento dos estoques de outras plantas da companhia também foi mapeada para casos críticos, para que a resposta a falhas críticas seja a mais rápida possível.

#### 6.5. CONFIABILIDADE HUMANA NA FÁBRICA

A confiabilidade humana, por sua vez, foi tratada da seguinte maneira durante o período de trabalho:

- Rotinas operacionais de limpeza, inspeção e lubrificação contaram com treinamento por mecânicos e operadores seniores;

- Rotinas de manutenção de grande impacto (10.000 e 20.000 horas) contaram com treinamentos instruídos pelos próprios fabricantes dos equipamentos;
- Rotinas de monitoramento por condição, como vibração e análise de óleo, tiveram treinamento realizado pela equipe de monitoramento terceirizada da planta;
- Treinamentos para instituição das rotinas de análise de falha de 5 por quês e análises profundas foram ministradas pelo engenheiro de confiabilidade da planta;
- Dentre outros treinamentos realizados conforme demanda na implantação dos resultados do RCM.

Os assuntos não eram satisfatoriamente endereçados na rotina da fábrica, o que causava diversos problemas, tanto em confiabilidade, quanto em manutenibilidade.

## 6.6. DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA E MANTENABILIDADE EM INFRAESTRUTURA NA FÁBRICA

Mesmo sendo uma fábrica antiga, com histórico de mais de 30 anos de operação e diversas alterações ao longo dos anos, os equipamentos possuíam documentação técnica adequada e desenhos de peças e arranjos que foram se alterando ao longo do tempo. Em casos específicos, os documentos se encontravam em deteriorados e desatualizados, e assim, nestes casos, houve uma tentativa de atualização: solicitou-se ao fabricante que fosse enviado a cópia digital do manual e do documento das peças de reposição atualizado.

Um outro aspecto relevante é a organização do acervo técnico. Mesmo sendo considerada uma fábrica de pequeno porte, com 120 funcionários nos três turnos, são contabilizados pouco mais de mil equipamentos e conjuntos. Isso significa dizer que é muito fácil ter um acervo onde não se consegue encontrar nenhum arquivo que se queira. Neste sentido, houve também a dedicação do time técnico para que os arquivos fossem organizados de maneira mais lógica.

Em relação à infraestrutura de manutenção e operação, mesmo antes do início das atividades do RCM na planta, já existia uma preocupação fundamentada sobre as estações de trabalho de cada operador e mantenedor, bem como a reposição de suas ferramentas básicas de trabalho. A contribuição do processo de RCM neste aspecto, foi a de clarificar os motivos pelos quais isto é importante para que a resposta a alguma ocorrência seja sempre a mais rápida e segura possível.

Em se falando de segurança, ferramentas adaptadas ou modificadas foram coletadas e descartadas, sendo substituídas pela ferramenta indicada e relevante para cada tipo de operação e manutenção. Claramente, este é um trabalho contínuo e deve ser observado ao longo da operação da planta a necessidade de reposição ou alteração de determinado equipamento ou ferramenta.

## **7. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Após 12 meses de dedicação exclusiva do time nas atividades do Plano de Confiabilidade, e com base nos conceitos apresentados aqui neste trabalho, a planta passou a ter rotinas muito mais bem instituídas de confiabilidade e manutenibilidade, sempre visando o aumento da disponibilidade da planta como um todo.

Com relação ao primeiro tópico do Plano de Confiabilidade, principalmente por ser antiga, novos e existentes projetos não eram adequadamente avaliados perante os conceitos de manutenibilidade e confiabilidade. Após o trabalho, no entanto, novos equipamentos já passaram a ser avaliados utilizando-se destes conceitos.

Dentro da rotina operacional da indústria, a prática da análise de falhas já era amplamente aplicada. O Plano de Confiabilidade trouxe, de fato, foi maior dedicação e análise dos dados que já estavam disponíveis perante os conceitos de recorrência de falha e de seu impacto.

Os conceitos da metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade estão em processo de implantação e com o time dedicado para este assunto, será possível manter o rigor e análise constante das falhas e atualização dos planos de manutenção.

A análise dos sobressalentes da fábrica, considerando o seu custo de capital empregado, seu lead time e o “giro” do sobressalente também já era uma prática implantada na unidade. Através da análise do “giro” dos componentes, bem como dos fornecedores cadastrados, é possível manter um estoque saudável e adequado para a manutenção da planta.

A confiabilidade humana, antes da avaliação do plano de confiabilidade, já era um assunto bem endereçado, com uma boa interface com o departamento de Recursos Humanos, visando principalmente treinamentos para o time técnico. Outro aspecto relevante não implantado na unidade, é a análise de procedimentos e regras operacionais e de manutenção. A aplicação da metodologia de Manutenção Centrada

em Confiabilidade busca avaliar estes procedimentos e regras, visando melhorar este critério do Plano de Confiabilidade.

Anteriormente a aplicação do Plano de Confiabilidade, a manutenibilidade em infraestrutura era, de fato, um aspecto muito negligenciado na fábrica. Isso foi endereçado avaliando o projeto original do equipamento, com apoio do material técnico de fabricantes, bem como das ferramentas de manutenção necessárias para cada tipo de manutenção.

### 7.1. RESULTADOS ESPECÍFICOS DA APLICAÇÃO DO RCM

A aplicação da metodologia descrita no capítulo 4 trouxe os resultados ilustrados pela figura 14. Devido à aplicação da ferramenta, houve um aumento de 5,4% no valor do homem-hora necessários para executar a estratégia de manutenção, bem como um aumento de 154% no custo do plano. Isso se deve, principalmente, à quantidade de planos de manutenção desvalorizados antes da aplicação do RCM.

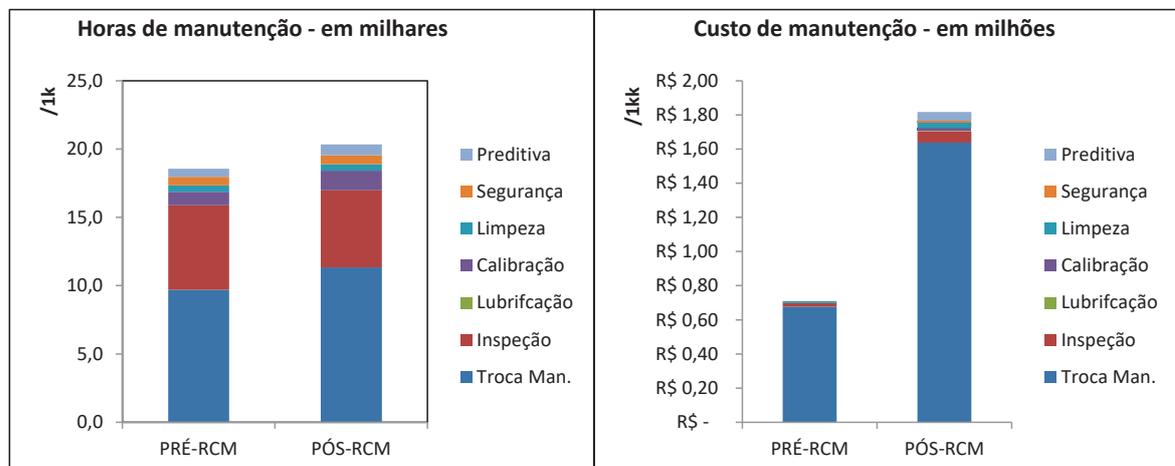


Figura 14. Principais resultados em horas e custo de manutenção.  
Fonte: O autor.

Com base nos dados disponíveis da planta, cerca de 95% dos planos preventivos e de serviço foi valorizado. Os procedimentos de manutenção e operação foram atualizados e disponibilizados ao time técnico, neste objetivo, 100% dos planos foram referenciados com procedimentos adequados.

Em termos de performance, a figura 15 ilustra a evolução de alguns indicadores utilizados na planta em questão. Em se tratando de desempenho das linhas, dois principais indicadores foram avaliados: eficiência de linha e OEE. Considerando o

desempenho da área de utilidades, o indicador avaliado é a indisponibilidade de utilidades.

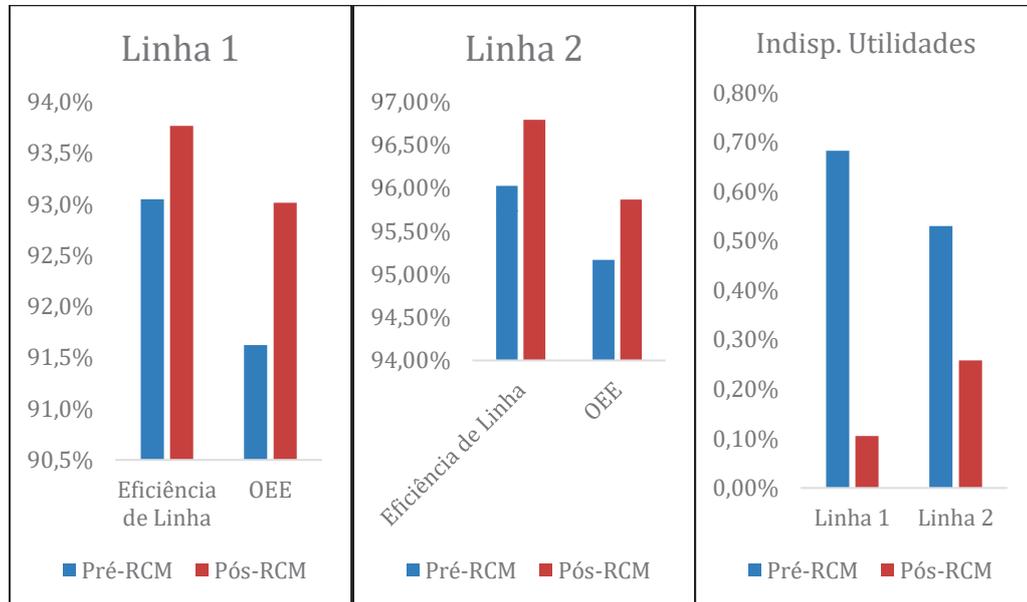


Figura 15. Indicadores de performance pré e pós-RCM.  
Fonte: O autor.

De maneira geral, após a metodologia ter sido aplicada nos equipamentos críticos das duas linhas de produção e na área de Utilidades, houve um aumento de 5% na quantidade de homem-hora requerido para executar os planos anualmente, um aumento de 150% nos custos esperados de manutenção e, em termos de performance, a linha aumentou sua eficiência em 1% e seu OEE em 1,5%. Resultado mais expressivo foi encontrado em Utilidades, onde houve uma redução da indisponibilidade em 50%.

## 8. CONCLUSÃO

O Plano de Confiabilidade, como visto neste trabalho, é um conjunto de ferramentas e conceitos que buscam aumentar a disponibilidade de uma unidade fabril. Pela robustez de toda a metodologia, é de se esperar que a aplicação no dia a dia da fábrica tenha que ser realizada com disciplina e resiliência, por também envolver a mudança de mentalidade de toda a gerência e, também, dos operadores e mantenedores.

Assim, conclui-se que o Plano de Confiabilidade está implementado de maneira parcial na planta fabril. Alguns conceitos, como a Análise de Falhas, aplicação da

metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade, Confiabilidade de Sobressalentes, são realizadas no dia a dia da planta. Por outro lado, os conceitos de Confiabilidade Humana, Confiabilidade e Manutenibilidade em projetos e em infraestrutura não são aplicados satisfatoriamente.

Futuramente, portanto, espera-se que estes planos de reprojeto e *redesign* dos equipamentos sejam levados em consideração: desde *retrofits* de equipamentos antigos (como inversores de frequência) até a implantação de novos equipamentos na planta (como uma nova caldeira).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos Mecânicos: Análise de Falhas e Solução de Problemas**. Qualitymark, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5419 – Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia**, 1994.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **CNI - Termômetro da Indústria**. Disponível em <<https://termometro.portaldaindustria.com.br/>>. Acesso em: 08 de maio de 2023.
- MOUBRAY, John. **Reliability Centred Maintenance**. Butterworth-Heinemann, 1997.
- NUNES, Enon Laércio. **Saberes da Manutenção: uma visão sistêmica**. Editora UFPR, 2015.
- SAE INTERNATIONAL, **JA1011 – Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes**
- STAPELBERG, Rudolf Frederick. **Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design**. Queensland, Springer, 2009.