



ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Aplicação da Teoria das Restrições na Gestão da Manutenção**

**JOÃO ALEXANDRE MASCARENHAS JORGE**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor António João P. da Costa Feliciano Abreu

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais: Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas  
Doutor António João P. da Costa Feliciano Abreu

Dezembro de 2017





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Aplicação da Teoria das Restrições na Gestão da Manutenção**

**JOÃO ALEXANDRE MASCARENHAS JORGE**  
**(Licenciado em Engenharia Mecânica)**

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor António João P. da Costa Feliciano Abreu

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais: Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas  
Doutor António João P. da Costa Feliciano Abreu

**Dezembro 2017**



*“O valor de uma ideia  
está na utilização da mesma”*

*Thomas Edison*



## **Agradecimentos**

Depois de muitos meses de trabalho e muito esforço, empenho e dedicação, tenho de agradecer aos meus pais, sem eles, não teria sido possível concluir esta etapa da minha vida académica.

Tenho a agradecer ao Doutor António Abreu, meu orientador, pela disponibilidade, pelos conselhos, análise crítica, orientação e pelos conhecimentos partilhados.

À administração da **MCG mind for metal**, pela oportunidade de realizar um caso de estudo, pela disponibilidade demonstrada e por toda a ajuda que me foi facultada. Agradecer ao Engenheiro Pedro Caré, Diretor de Engenharia, e ao Engenheiro Daniel Augusto pela disponibilidade e ajuda dispensadas nesta fase.

Por fim, e não menos importante, agradecer a todos os meus colegas e restantes familiares que me apoiaram e incentivaram para conseguir terminar esta etapa.



## Resumo

O presente documento, propõe descrever um modelo de aplicação da Teoria das Restrições nas atividades de gestão da manutenção, sector que é visto, hoje em dia, como um dos fatores predominantes para a obtenção de resultados financeiros de qualquer organização. Este documento, pretende também, mostrar a aplicabilidade em contexto real, deste modelo, numa organização do ramo metalúrgico, em que a manutenção é um dos pontos essenciais para o bom funcionamento, tanto de equipamentos como de instalações.

Para que seja possível identificar e resolver, problemas relacionados com as atividades de gestão da manutenção, são sugeridas várias ferramentas (tais como: Ferramentas de Pensamento Lógico, *Drum-Buffer-Rope*, *Critical Chain*, entre outras), relacionadas com a Teoria das Restrições, em que são apresentados os prós e contras de cada ferramenta, dando assim a informação de qual a melhor ferramenta, a aplicar, em situações distintas que possam aparecer em cada organização.

Neste trabalho, foi feita a análise à situação atual da organização, e a partir dessa análise foi aplicado o modelo desenvolvido. Este modelo permitiu, identificar os problemas relacionados com a gestão, e em seguida, apresentar uma proposta que visa resolver os problemas identificados.

**Palavras-Chave:** Teoria das Restrições; Manutenção Industrial; TLS; Ferramentas de Pensamento Lógico; *Drum-Buffer-Rope*; *Critical Chain*.



## **Abstract**

This document proposes to describe a model of application of the Theory of Constraints in maintenance management activities, a sector that is nowadays seen as one of the predominant factors for the profit management of any organization. This document also intends to show the applicability in a real context of this model in an organization of the metallurgical branch, where maintenance is one of the essential points for the good functioning of both equipment and facilities.

In order to identify and solve problems related to maintenance management activities, several tools are suggested (such as: Logical Thinking Tools, Drum-Buffer-Rope, Critical Chain, among others) related to Theory of Constraints, in which the pros and cons of each tool are presented, thus giving the information of the best tool to apply, in different situations that may appear in each organization.

In this work, the analysis was made to the current situation of the organization, and from this analysis the developed model was applied. This model allowed, identify the problems related to management, and then present a proposal that addresses the identified problems.

**Keywords:** *Theory of Constraints; Industrial maintenance; TLS; Logical Thinking Tools; Drum-Buffer-Rope; Critical Chain.*



## Glossário

**Árvore de Pré-Requisitos (PRT) – do Inglês *Prerequisite Tree*** – Identifica os objetivos e os melhores métodos para ultrapassar os obstáculos.

**Árvore de Realidade Atual (CRT) – do Inglês *Current Reality Tree***– Começa por identificar as fraquezas do negócio e as causas do problema ou o problema-raiz.

**Árvore de Realidade Futura (FRT) – do Inglês *Future Reality Tree*** – Permite verificar quais as ações a efetuar para resolver os conflitos e atingir os resultados esperados e auxilia na identificação de possíveis novas adversidades das ações tomadas.

**Árvore de Transição (TT) – do Inglês *Transition Tree*** – Desenvolve os passos necessários para a implementação das ações.

**Avaria** - Cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida.

**Bem** – Qualquer elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente.

**Curva da Banheira** – Gráfico de taxa de avarias ( $\lambda(t)$ ). Existem três zonas distintas onde o comportamento dos bens é diferente.

**Diagrama de Resolução de Conflitos (CRD) – do Inglês *Conflict Resolution Diagram*** – É utilizado para resolver conflitos escondidos da organização que prolongam os problemas crónicos.

**Falha** – Em fiabilidade, considera-se que falha da função requerida significa cessação de funcionamento ou, mais frequentemente, degradação de um parâmetro de funcionamento até ao nível considerado insatisfatório.

**Fiabilidade** – É a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições durante um dado intervalo de tempo, utilizando-se também o termo para quantificar o desempenho da fiabilidade que pode também ser definido como uma probabilidade.

**Manutenção** – Combinação de todas as ações técnicas administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida.

**Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) – do Inglês *Reliability Centered Maintenance*** – É um método sistemático para determinar quais devem ser os requisitos de manutenção de forma a assegurar que qualquer equipamento continue a desempenhar as funções requeridas no seu contexto operacional.

**Manutenção Condicionada** – Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes.

**Manutenção Corretiva** – Manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria, e destinada a repor o bem num estado em que possa realizar uma função requerida.

**Manutenção de Urgência** – Manutenção corretiva que é realizada imediatamente após a deteção de uma falha a fim de evitar consequências inaceitáveis.

**Manutenção Preditiva** – Manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem.

**Manutenção Preventiva** – Manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação de funcionamento de um bem.

**Manutenção Programada** – Manutenção preventiva efetuada de acordo com um calendário preestabelecido ou de acordo com um número definido de unidades de utilização.

**Manutenção Sistemática** – Manutenção preventiva efetuada a intervalos de tempo preestabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem.

**Manutibilidade** – É a opção de um bem sob condições de utilização definidas de ser mantido ou repostado num estado em que possa cumprir uma função requerida depois de lhe ser aplicada manutenção em condições determinadas, utilizando procedimentos e meios prescritos.

**Melhoria** – Conjunto de medidas de natureza técnica, administrativa e de gestão, destinadas a melhorar a segurança de funcionamento de um bem sem modificar a sua função requerida.

**Modificação** – Conjunto de medidas de natureza técnica, administrativa e de gestão, destinadas a mudar a função de um bem.

**Plano de Manutenção** – Conjunto estruturado de tarefas que compreendem as atividades, os procedimentos, os recursos e a duração necessários para executar a manutenção.

**Tempo de Bom funcionamento (TBF) – do Inglês *Time Between Failures*** – Tempo entre duas avarias consecutivas num determinado equipamento.

**Tempo Médio até à Falha (MTTF) – do Inglês *Mean Time To Failure*** – Previsão matemática do tempo de falha dos vários componentes da amostra referente ao ensaio considerado, para componentes não reparáveis.

**Tempo Médio de Funcionamento (MUT) – do Inglês *Mean Up Time*** – Tempo em que o equipamento se encontra disponível para assegurar a mesma função.

**Tempo Médio de Funcionamento entre Avarias (MTBF) – do Inglês *Mean Time Between Failures*** – Previsão matemática do tempo de funcionamento entre avarias, para componentes reparáveis.

**Tempo Médio de Paragem (MDT) – do Inglês *Mean Down Time*** – Tempo em que o equipamento se encontra indisponível para assegurar a função para qual foi concebido.

**Tempo Médio de Reparação de Avarias (MTTR) – do Inglês *Mean Time To Repair*** – Previsão matemática do tempo de reparação de uma dada avaria.

**Tempo Total de Reparação (TTR) – do Inglês *Time to Repair*** – Tempo entre o momento em que se deteta a avaria e o momento em que o equipamento volta às suas condições normais de trabalho após ser reparado.

**Teoria das Restrições (TOC) – do Inglês *Theory of Constraints*** - Paradigma de gestão que considera qualquer sistema, como limitado em relação aos seus objetivos por um número muito pequeno de restrições.

**Vida útil** – Intervalo de tempo, em condições determinadas, que se inicia num determinado instante e termina quando a taxa de avarias assume valores inaceitáveis, ou quando o bem é considerado irreparável na sequência de uma avaria ou por outras razões pertinentes.



## **Lista de Acrónimos**

<b>5W</b>	<i>Five Whys</i>
<b>BM</b>	<i>Buffer Management</i>
<b>CB</b>	<i>Constraint Buffer</i>
<b>CC</b>	<i>Critical Chain</i>
<b>CCR</b>	<i>Capacity-Constraint-Resource</i>
<b>CP</b>	<i>Critical Path</i>
<b>CR</b>	<i>Causa Raiz</i>
<b>CRD</b>	<i>Conflict Resolution Diagram</i>
<b>CRT</b>	<i>Current Reality Tree</i>
<b>DBR</b>	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
<b>e.g.</b>	<i>Por exemplo</i>
<b>ED</b>	<i>Efeito Desejável</i>
<b>EI</b>	<i>Efeito Indesejável</i>
<b>FRT</b>	<i>Future Reality Tree</i>
<b>I</b>	<i>Inventory</i>
<b>LCM</b>	<i>Lean Centered Maintenance</i>
<b>MDT</b>	<i>Mean Down Time</i>
<b>MRP</b>	<i>Material Requirement Planning</i>
<b>MTBF</b>	<i>Mean Time Between Failures</i>
<b>MTTF</b>	<i>Mean Time To Failure</i>
<b>MTTR</b>	<i>Mean Time To Repair</i>
<b>MUT</b>	<i>Mean UP Time</i>
<b>OBS</b>	<i>Obstáculo</i>
<b>OEE</b>	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>

<b>OI</b>	<i>Objetivo Intermediário</i>
<b>OPT</b>	<i>Optimized Production Technology</i>
<b>PM</b>	<i>Project Manager</i>
<b>PMEs</b>	<i>Pequenas e Médias Empresas</i>
<b>PR</b>	<i>Problema Raiz</i>
<b>PRT</b>	<i>Prerequisite Tree</i>
<b>RCM</b>	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
<b>SB</b>	<i>Shipping Buffer</i>
<b>T</b>	<i>Throughput</i>
<b>TBF</b>	<i>Time Between Failures</i>
<b>TFM</b>	<i>Trabalho Final de Mestrado</i>
<b>TOC</b>	<i>Theory of Constraints</i>
<b>TPM</b>	<i>Total Productive Maintenance</i>
<b>TPS</b>	<i>Toyota Production System</i>
<b>TQM</b>	<i>Total Quality Management</i>
<b>TT</b>	<i>Transition Tree</i>
<b>TTR</b>	<i>Time To Repair</i>
<b>WIP</b>	<i>Work In Progress</i>

# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Âmbito e Motivação do TFM .....	1
1.2.	Objetivo.....	2
1.3.	Empresa.....	2
1.4.	Organização do TFM.....	3
2.	Gestão da Manutenção.....	4
2.1.	Manutenção Industrial .....	5
2.2.	O Papel da Manutenção .....	6
2.3.	Evolução da Manutenção.....	7
2.4.	Filosofias de Gestão da Manutenção .....	11
2.4.1.	RCM.....	11
2.4.2.	LCM.....	12
2.4.3.	TPM .....	15
2.4.4.	TPM e LCM.....	18
2.4.5.	TPM e RCM.....	19
2.5.	Indicadores de desempenho da manutenção.....	19
2.5.1.	OEE.....	19
2.5.2.	Fiabilidade.....	20
2.5.3.	Manutibilidade .....	24
2.5.4.	Disponibilidade .....	26
2.6.	Abordagem <i>Lean</i> na Manutenção .....	26
2.6.1.	Os princípios do <i>Lean Thinking</i> .....	27
2.6.2.	Metodologia <i>Lean</i> .....	29
3.	Teoria das Restrições .....	34
3.1.	Conceito e Tipos de Restrições.....	35

3.2.	Melhoria Contínua .....	39
3.3.	Ferramentas da TOC .....	42
3.3.1.	<i>Ferramentas de Pensamento Lógico</i> .....	43
3.3.2.	<i>Drum-Buffer-Rope</i> .....	49
3.3.3.	CC .....	53
3.3.4.	<i>Buffer Management</i> .....	59
3.3.5.	<i>Análise V-A-T-I</i> .....	62
3.3.6.	Medidas de Desempenho .....	64
3.4.	TOC, <i>Lean</i> e Seis Sigma .....	65
3.4.1.	Combinação das técnicas .....	66
4.	Modelo de implementação da TOC na Gestão da Manutenção.....	70
5.	Caso de Estudo.....	78
5.1.	Definição do Problema Proposto .....	78
5.2.	Implementação do modelo IPR.....	79
5.2.1.	1ª Etapa – Identificar.....	79
5.2.2.	2ª Etapa – Planear .....	85
5.2.3.	3ª Etapa – Resolver .....	89
6.	Conclusão.....	94
	Referências Bibliográficas .....	96

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de Manutenção .....	10
Figura 2.2 – Ciclo de Melhoria contínua PDCA.....	13
Figura 2.3 – Exemplo de um procedimento formal para aplicação dos 5W.....	15
Figura 2.4 - 8 Pilares do TPM.....	17
Figura 2.5 – Estrutura de perdas do OEE. ....	20
Figura 2.6 – Padrão de falhas ou "Curva da Banheira" .....	23
Figura 2.7 – Indicadores de Manutenção.....	25
Figura 3.1 – Tipos de Restrições.....	36
Figura 3.2 – 5 Passos da Melhoria Contínua .....	40
Figura 3.3 – Esquema de Elementos TOC.....	42
Figura 3.4 – Ferramentas Lógicas Integradas no Processo de Reflexão.....	43
Figura 3.5 – Diagrama da CRT.....	44
Figura 3.6 – Diagrama da CRD .....	45
Figura 3.7 – Diagrama da FRT .....	46
Figura 3.8 – Diagrama da PRT.....	47
Figura 3.9 – Diagrama da TT.....	48
Figura 3.10 – Nível de experiência por funcionário. ....	50
Figura 3.11 – Critical Path vs. Critical Chain.....	58
Figura 3.12 – Esquema de zonas de ação. ....	61
Figura 3.13 – Análise V-A-T-I .....	62
Figura 3.14 – Contribuição para a redução de custos de cada modelo .....	68
Figura 4.1 – Modelo IPR .....	71
Figura 4.2 – Objetivo de cada etapa do modelo.....	71
Figura 5.1 – Exemplo de um procedimento formal para aplicação dos 5W.....	81

Figura 5.2 – Diagrama da CRT.....	84
Figura 5.3 – Como ler a CRT.....	84
Figura 5.4 – Diagrama para o CRD. ....	86
Figura 5.5 – Diagrama para a FRT. ....	88
Figura 5.6 – Diagrama para a PRT para a 1ª "Injeção". ....	90
Figura 5.7 – Diagrama para a PRT para a 2ª e 3ª "Injeção".....	90
Figura 5.8 – Diagrama para a TT.....	91

## **Índice de Tabelas**

Tabela 3.1 – Topologias da Análise V-A-T-I.....	63
Tabela 4.1 – Ferramentas da 1ª Etapa do modelo IPR.....	72
Tabela 4.2 – Ferramentas da 2ª Etapa do modelo IPR.....	73
Tabela 4.3 – Ferramentas da 3ª Etapa do modelo IPR.....	74
Tabela 5.1 – Aplicação dos 5W .....	82



# 1. Introdução

No presente capítulo, pretende-se fazer uma breve introdução ao tema, e de seguida falar sobre a motivação que levou a desenvolver o mesmo.

## 1.1. Âmbito e Motivação do TFM

A indústria, como a maior parte da generalidade dos sectores, tem que suportar custos operacionais elevados, mais precisamente, relacionados com a manutenção, que têm vindo a aumentar, significativamente, nas últimas décadas.

A função manutenção, há muito que deixou de ser considerada um “mal necessário”, para assumir uma posição charneira para o sucesso dos Negócios, com características de gerador de lucros para as empresas nos países do chamado Primeiro Mundo.

A Manutenção, é hoje, uma área estratégica de desenvolvimento, sendo um fator importante para o crescimento sustentado e aumento da competitividade das empresas. A procura da excelência nos processos de Manutenção através da implementação de práticas de manutenção mais eficientes, como por exemplo a execução de atividades de manutenção de forma pró-ativa recorrendo a meios de deteção e isolamento de avarias em tempo real, a execução de intervenções de manutenção por equipas multifuncionais; a otimização sistemática dos processos de manutenção existentes, tornou-se uma estratégia de sobrevivência para as empresas (Veldman et al, 2011).

Assim, como instrumento de suporte a uma gestão de alto desempenho é urgente desenvolver ferramentas e metodologias que permitam evitar a proliferação de processos manutenção ineficazes. A Teoria das Restrições (TOC – *Theory of Constraints*) tem como objetivo promover a melhoria do desempenho global, através da concentração de esforços na resolução da principal restrição de um qualquer sistema de forma sistemática, sucessiva e continuada. Este trabalho, propõe um modelo de implementação da Teoria das Restrições, para a gestão das atividades de manutenção. Para demonstrar a

aplicabilidade do modelo, proposto no contexto da manutenção, este foi aplicado numa organização.

A Teoria das Restrições, originalmente aplicada com o intuito de melhorar os sistemas produtivos, tem vindo a ser estudada a sua aplicação em diversas áreas. A sua aplicabilidade na gestão de atividades de manutenção, é uma área onde ainda não existem estudos concretos, pelo que torna este tema, deveras interessante quanto aos resultados que possam vir a ser conseguidos.

O que torna a Teoria das Restrições numa metodologia de melhoria contínua, poderosa dentro de qualquer sistema, é o facto de com as suas ferramentas ser possível simular todas as ações a serem aplicadas.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo do presente documento é desenvolver um modelo baseado na Teoria das Restrições, que permita identificar problemas relacionados com a gestão da manutenção, e através da sua aplicação, conseguir eliminar, ou minimizar, a ocorrência ou impacto dos problemas identificados.

Através da Teoria das Restrições, pretende-se introduzir um conjunto de ferramentas, que servirão como pilares de sustentação da gestão da manutenção.

Deve ser avaliado o impacto da aplicação do modelo baseado na Teoria das Restrições, através de uma análise de um caso de estudo concreto, que será desenvolvido numa empresa específica.

## **1.3. Empresa**

A **MCG mind for metal**, é uma empresa que conta já com 60 anos de história, dedicada à indústria de componentes metálicos.

A empresa tem vindo a desenvolver a sua atividade com base na ética e na sustentabilidade. É uma empresa de nome reconhecido pela sua base de clientes e

parceiros. Focam o negócio em parcerias de longo prazo, na competência e confiança mútua. Este tem sido o seu compromisso ao longo dos anos e será, também, no futuro.

Na sua equipa de trabalho juntam experiência e jovens engenheiros focados na aprendizagem e crescimento.

## **1.4. Organização do TFM**

O presente TFM (Trabalho Final de Mestrado), está dividido em seis capítulos.

No **1º Capítulo** descreve-se o âmbito e as motivações do TFM, os objetivos a alcançar neste trabalho, é elaborada uma breve descrição da empresa onde foi feito o caso de estudo e é descrita a organização do TFM.

No **2º Capítulo** fala-se da gestão da manutenção, é feita uma descrição do que é a manutenção industrial, o papel da manutenção na indústria, a sua evolução, as teorias que a suportam, os seus indicadores de desempenho e fala-se, também, da abordagem *Lean* na manutenção.

No **3º Capítulo** é descrito o estado de arte referente à Teoria das restrições, fala-se do conceito e dos tipos de restrições, da melhoria contínua, descreve-se as ferramentas da TOC e é feita uma abordagem entre a TOC, o *Lean* e o Seis Sigma.

No **4º Capítulo** é desenvolvido um modelo, com base na Teoria das Restrições, com o intuito de identificar e resolver, problemas relacionados com a gestão da manutenção.

No **5º Capítulo** é realizado o caso de estudo. Neste capítulo é avaliada a implementação do modelo desenvolvido no capítulo anterior. Serão apresentados os problemas identificados na empresa e as propostas de resolução desses problemas a partir da implementação do modelo.

No **6º Capítulo** são apresentadas as conclusões do estudo realizado. É feita uma breve análise aos resultados obtidos e é feita também uma análise ao trabalho que poderá vir a ser desenvolvido no futuro de maneira a evoluir o modelo implementado e melhorar a análise efetuada.

## **2. Gestão da Manutenção**

A função manutenção conotada, no passado como uma atividade secundária, consumidora de recursos humanos e financeiros razão pela qual muitos gestores de PMEs a considerava como um “mal necessário” para a função produção. Atualmente, com a nova revolução industrial designada por Industria 4.0, apoiada na crescente evolução da tecnologia e na progressiva automação dos equipamentos revelam uma tendência para a sofisticação e complexidade dos processos produtivos, o que se traduz em prejuízos avultados sempre que ocorrem paralisações não programadas, com impactos determinantes na rentabilidade das empresas.

Por outro lado, a globalização tem sido a principal força motriz que faz com que as empresas tenham necessidade de operar com altos níveis de desempenho, para assegurarem a sua sobrevivência.

Nos dias de hoje, é possível identificar várias variáveis que influenciam o desenvolvimento dos processos de produção como por exemplo, pressões do mercado para a melhoria da qualidade, a redução do tempo de produção e de custos e o aumento da agilidade na produção (Cabral, 2006).

A introdução com maior frequência no mercado de novos produtos com menores intervalos de tempo tem sido, nos tempos mais recentes, a estratégia de sobrevivência de algumas empresas para conquistar novos clientes e como resposta à diversidade de opções disponíveis no mercado (Veldman et al, 2011).

Esta realidade impõe à Manutenção a adoção de uma nova postura, multidisciplinar, sistémica e preocupada em alcançar períodos elevados entre avarias operacionais, bem como, redução dos períodos necessários para efetuar as correspondentes intervenções de reparação dos equipamentos e sistemas (Veldman et al, 2011).

No atual contexto, as atividades de manutenção nas empresas, mesmo nas pequenas, têm de ser geridas como nas organizações “transnacionais” o seu mercado pode ainda ser local ou regional, mas a concorrência é global.

Entrámos na era da Qualidade Total, da Manutenção Pró-ativa, da Manutenção Inteligente, da Manutenção Produtiva Total, da Manutenção Lean Six Sigma (Cabral, 2006).

## **2.1. Manutenção Industrial**

Segundo a NP EN 13306:2010<sup>1</sup>, Manutenção é a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”.

De acordo com a mesma norma, a gestão da manutenção são “todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção e que os implementem por diversos meios tais como o planeamento, o controlo e supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo os aspetos económicos”.

Os objetivos da manutenção industrial têm que ser ligados aos objetivos globais da organização já que a manutenção afeta a rentabilidade do processo produtivo por via tanto da sua influência no volume e na qualidade da produção como do seu custo: por um lado, melhora o desempenho e a disponibilidade do equipamento, por outro, acresce aos custos de funcionamento. O segredo está em encontrar o ponto de equilíbrio entre benefício e custo que maximize o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade geral da empresa.

Objetivos da Manutenção:

- Reduzir custos;
- Evitar paragens com perdas de produção;
- Reduzir tempos de não disponibilidade do equipamento;
- Reduzir emergências e número de avarias;
- Melhorar a qualidade da produção;
- Aumentar a segurança;

---

<sup>1</sup> NP EN 13306:2010 – Norma Portuguesa – Terminologia da Manutenção

- Aumentar o tempo de vida dos equipamentos;
- Aumentar o *output* da produção.

## **2.2. O Papel da Manutenção**

Segundo Veldman et al. (2011) nos últimos anos os engenheiros industriais chegaram à conclusão que a manutenção, pode ser utilizada para produzir lucro em vez de ser apenas um custo. Segundo Souza (2011) os principais fatores para esta alteração foram:

- Os processos de manutenção, relacionados com sistemas de produção, sejam executados de modo eficiente, com fiabilidade, eficácia e a um custo reduzido;
- Manter o *layout* dos equipamentos, o mais próximo possível, das condições iniciais de projeto;
- Efetuar melhorias e modificações tecnológicas, através de estudos técnicos, de modo a atender às necessidades da produção;
- Reduzir, ou mesmo eliminar, os tempos de paragem por avarias urgentes, que provoquem perdas no processo produtivo;
- Manter as normas regulamentares de higiene, saúde e segurança no trabalho;
- Manter um consumo energético adequado para os equipamentos e instalações, de modo a reduzir custos e identificar falhas, ou equipamentos em estado de envelhecimento;
- Garantir o máximo de utilização e de aproveitamento dos recursos disponíveis.

Atualmente, a manutenção é vista numa perspetiva diferente nas organizações, pois o mercado é cada vez mais competitivo, sendo necessária a constante atualização e a busca de novas formas de produzir com mais qualidade, cumprindo prazos de entrega, sendo por isso uma peça fundamental para o sucesso das organizações (Kardec, A. & Nascif, J., 2003).

## **2.3. Evolução da Manutenção**

A manutenção, a par das crescentes exigências de produção das indústrias, teve uma enorme evolução até ao presente. Foi no início do século XX que surgiram os primeiros sinais de uma estruturação do processo de manutenção (Tavares, 2005).

Segundo Tavares (2005), a evolução histórica da manutenção está dividida em quatro fases:

### ***1ª Fase***

Vai até ao ano de 1914, onde a manutenção tinha pouca importância; era considerada como secundária no processo produtivo. As indústrias da época não tinham equipas especializadas em manutenção e trabalhavam obtendo a máxima produção das máquinas até que estas avariassem ou parassem definitivamente (Tavares, 2005).

A partir da Primeira Guerra Mundial, as indústrias, de um modo em geral, querendo manter uma produção mínima, criaram um departamento, subordinado à produção. O objetivo básico era fazer manutenção corretiva dos equipamentos, ou seja, quando os equipamentos parassem de produzir, por algum motivo, a manutenção era acionada para fazerem a devida reparação, voltando assim ao processo produtivo, o que para a época era suficiente.

### ***2ª Fase***

A situação apresentada na fase anterior corresponde à época da “avaria-repara”, mantendo-se assim até aos anos 30 quando, em função da Segunda Guerra Mundial houve necessidade de aumentar a produção, bem como a sua rapidez, para poder responder a uma procura crescente.

Nessa altura, as indústrias, através dos seus órgãos máximos, decidiram criar um departamento de manutenção, para que houvesse uma preocupação não só em corrigir as avarias, mas também em evitá-las. Foi nessa época que começou a ser pensado como seria possível manter o sector daí em diante, ou seja, o que a manutenção devia fazer para que as máquinas pudessem produzir o maior número de peças com a maior disponibilidade possível (Tavares, 2005).

### ***3ª Fase***

De 1940 até 1970, com o desenvolvimento da aviação comercial, houve uma expansão de critérios de manutenção preventiva, uma vez que não havia possibilidade de executar a manutenção corretiva num avião em pleno voo.

Esta fase é considerada a mais importante, já que possibilitou um incremento do reconhecimento na parte da manutenção. A manutenção passou a ser vista de outra forma, evoluindo de uma função de reparar os equipamentos, para uma função mais qualificada (mais exigente em termos técnicos e científicos), como é o caso da análise de falhas de equipamentos, antecipando-se aos problemas ou às falhas (Tavares, 2005).

### ***4ª Fase***

Apareceu no início dos anos setenta, com a tecnologia existente nessa altura. Com o desenvolvimento dos computadores, foi melhorada e modificada a função manutenção, designadamente através da introdução de sistemas de informação (Tavares, 2005).

Nestes anos apareceu a manutenção preventiva condicionada, que consiste em executar a manutenção nos componentes só quando existe necessidade. É uma manutenção planeada subordinada a um tipo de acontecimento pré-determinado, cuja predição é feita através da análise de dados adquiridos através de sensores, ou medidos regularmente através de equipamento específico (Tavares, 2005).

Com esta abordagem, assim que se verifique um desgaste ou outro indicador que possa revelar o estado de degradação do equipamento é lançado um alerta para que seja executada a correspondente intervenção de manutenção.

Estes factos colocam a manutenção numa situação controlada e conseqüentemente mais económica para as empresas, com impacto na produção e, principalmente, com mais segurança para os trabalhadores e para o meio ambiente. A manutenção não é só a reparação das máquinas avariadas, mas também antecipar-se às falhas e à determinação dos melhores períodos económicos para a execução da manutenção preventiva que, na maioria dos casos, deixa de ser baseada no tempo (Tavares, 2005).

Nos anos oitenta apareceu, no Japão, a manutenção produtiva total, mais conhecida por TPM (Total Productive Maintenance).

No ano dois mil apareceu a *e-Maintenance* que é o resultado da aplicação das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) na indústria, baseadas na desmaterialização digital e da integração de tecnologias convergindo num sistema de informação de gestão de manutenção.

Segundo a Norma NP EN 13306:2010 a manutenção divide-se nos seguintes tipos e estratégias:

- **Manutenção Preventiva** – Manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem;
- **Manutenção Programada** – Manutenção preventiva efetuada de acordo com um calendário pré-estabelecido ou de acordo com um número definido de unidades de utilização;
- **Manutenção Sistemática** – Manutenção preventiva efetuada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem;
- **Manutenção Condicionada** – Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes;
- **Manutenção Preditiva** – Manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas de análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem;
- **Manutenção Corretiva** – Manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida;
- **Manutenção Remota** – Manutenção de um bem efetuado sem o acesso físico por parte do pessoal;
- **Manutenção Diferida** – Manutenção corretiva que não é efetuada imediatamente depois da deteção de um estado de falha, mas que é retardada de acordo com regras de manutenção determinadas;
- **Manutenção de Urgência** – Manutenção corretiva que é efetuada imediatamente após a deteção de um estado de falha, para evitar consequências inaceitáveis;

- **Manutenção em Funcionamento** – Manutenção efetuada durante o tempo em que o bem está em funcionamento;
- **Manutenção no Local** – Manutenção efetuada no local onde o bem funciona;
- **Manutenção pelo Operador** – Manutenção efetuada por um utilizador ou um operador do bem.

Em resumo, pode dizer-se que a manutenção não planeada (corretiva) é efetuada de forma a corrigir um problema detetado e a colocar o equipamento de novo em funcionamento. Esta pode ser imediata, ou diferida com base em regras para melhor agendamento na intervenção caso o equipamento possa esperar.

Já no caso da manutenção preventiva esta é programada, efetuada de forma a prevenir uma falha no equipamento. Pode ser sistemática, quando é efetuada segundo um número de horas ou ciclos de produção pré-determinado. Será condicionada ou preditiva quando são efetuadas técnicas de análise de parâmetros que permitem uma adequada previsão da falha, permitindo efetuar a manutenção independente do tempo de funcionamento, mas sim com base no estado de degradação do equipamento.

Na Figura 2.1, pode se verificar a representação básica destas estratégias e tipos de manutenção:

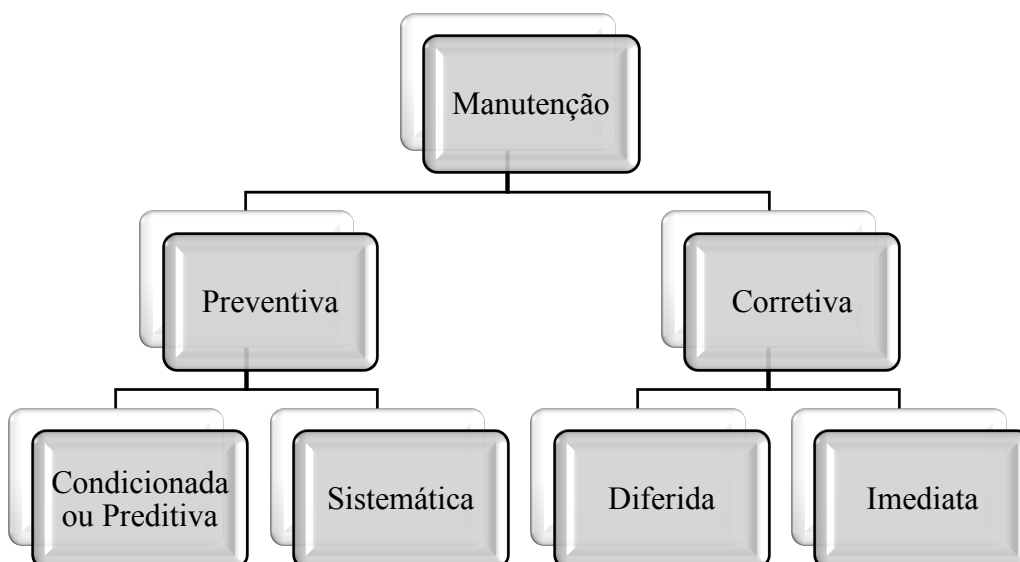


Figura 2.1 – Tipos de Manutenção. Adaptado de NP EN 13306:2010

## **Manutenção Pró-Ativa**

A manutenção pró-ativa efetua uma abordagem da manutenção, substituindo a filosofia de manutenção de “falha reativa por falha proactiva”, evitando as condições implícitas que levam às falhas e à degradação da máquina.

Segundo Fitch (2008), a manutenção pró-ativa cria ações de modo a identificar a causa raiz da falha, não apenas os sintomas. Tem como objetivo principal aumentar a vida da máquina ao invés de efetuar reparações quando o item físico está degradado, aceitando a falha como uma rotina normal, substituindo a manutenção de falha de crise pela manutenção de falha programada. Na maioria dos casos, os sintomas escondem a causa raiz ou são eles próprios considerados como a causa.

A maioria das máquinas são sistemas dependentes de fluídos, tais como lubrificantes, fluídos hidráulicos, líquidos refrigerantes, combustíveis e ar que carregam e transportam contaminantes dentro do sistema. A presença anormal de contaminação num sistema pode ser descrita como a etapa inicial da falha, apesar da máquina ainda não apresentar perda de desempenho ou degradação do componente.

## **2.4. Filosofias de Gestão da Manutenção**

### **2.4.1. RCM**

A metodologia *RCM* (*Reliability-Centered Maintenance*) começou a ser desenvolvida na indústria aeronáutica, por volta dos anos 1960, com o objetivo de estabelecer um processo racional e sistemático de análise que permitisse a definição das tarefas de manutenção dos equipamentos para garantir a fiabilidade e segurança operacional ao menor custo possível.

A *RCM* é um processo de melhoria do desempenho dos equipamentos e instalações baseado na análise das funções dos mesmos. É aplicado em áreas como o estabelecimento de níveis mínimos de segurança em manutenção, alteração das práticas de manutenção, e definição de regimes e rotinas de manutenção (Pinto, 2016).

Uma implementação bem-sucedida de manutenção centrada na fiabilidade levará a uma redução efetiva de custos, aumento da disponibilidade de equipamentos e sistemas e uma melhor compreensão dos riscos (Pinto, 2016).

A implementação de métodos automáticos de produção resultou numa maior dependência da sociedade contemporânea, interferindo assim com o desenvolvimento de estratégias que se diferenciam dos planos tradicionais devido ao facto de combinar princípios de disponibilidade dos equipamentos, qualidade do produto, segurança e meio ambiente.

Atualmente exige-se que os processos de projeto e manutenção dos meios da produção estejam estruturados de forma clara e auditável, permitindo à sociedade exercer um papel de promoção e fiscalização (Siqueira, 2009).

O *RCM* contribui também para estabelecer a busca da melhoria da manutenção, focando-se no estudo das consequências das falhas e processos pró-ativos, os quais envolvem tarefas preditivas; também permite identificar falhas ocultas responsáveis pela redução da fiabilidade do sistema (Pinto, 2016).

Nos anos 70, diversas indústrias adotaram a utilização de *RCM* para determinar políticas internas mais eficientes para gerir as funções dos bens físicos, bem como gerir as consequências das suas falhas. A partir dos anos 90, o *RCM* passou a ser uma parte integrante do sector industrial, devido aos custos de manutenção se tornarem elevados em comparação com os custos operacionais. A manutenção passou a ser analisada com planeamento e controlo, numa tentativa de se obter um aumento da vida útil dos bens físicos (Pinto, 2016).

#### **2.4.2. LCM**

O *LCM* (*Lean Centered Maintenance*) é a aplicação do pensamento *Lean* à área da manutenção. Segundo Pinto (2016) a *LCM* é definida como uma operação proactiva que emprega processos de manutenção planeada através de práticas *TPM*, usando estratégias de Manutenção Centrada na Fiabilidade (*RCM*), e recorrendo a equipas autónomas através do uso correto de sistemas informáticos de apoio à manutenção.

O *LCM* é suportado por um sistema de gestão de materiais e peças-de-reserva que garantem o fornecimento *Just In Time* (*JIT*), apoiada num grupo de engenharia de fiabilidade que realiza análise de causas e efeitos (*Root Cause Failure Analysis – RCFA*)

e análises de manutenção preditiva/condicionada; segundo Pinto (2016) reparar não é sinónimo de manutenção.

#### 2.4.2.1. Ciclo PDCA

O ciclo PDCA (*Plan; Do; Check; Act*) foi promovido por Deming a partir dos anos 1950, no Japão, e caracteriza-se pelo modo simples e sistemático com que orienta as pessoas na implementação de ações que visam a mudança, a resolução de problemas ou a implementação de projetos. A simplicidade do ciclo PDCA faz com que muitos (Pinto, 2016), o considerem de forma aligeirada, não o aplicando formalmente. Como consequência, a maioria dos projetos falha ou fica aquém dos resultados esperados.

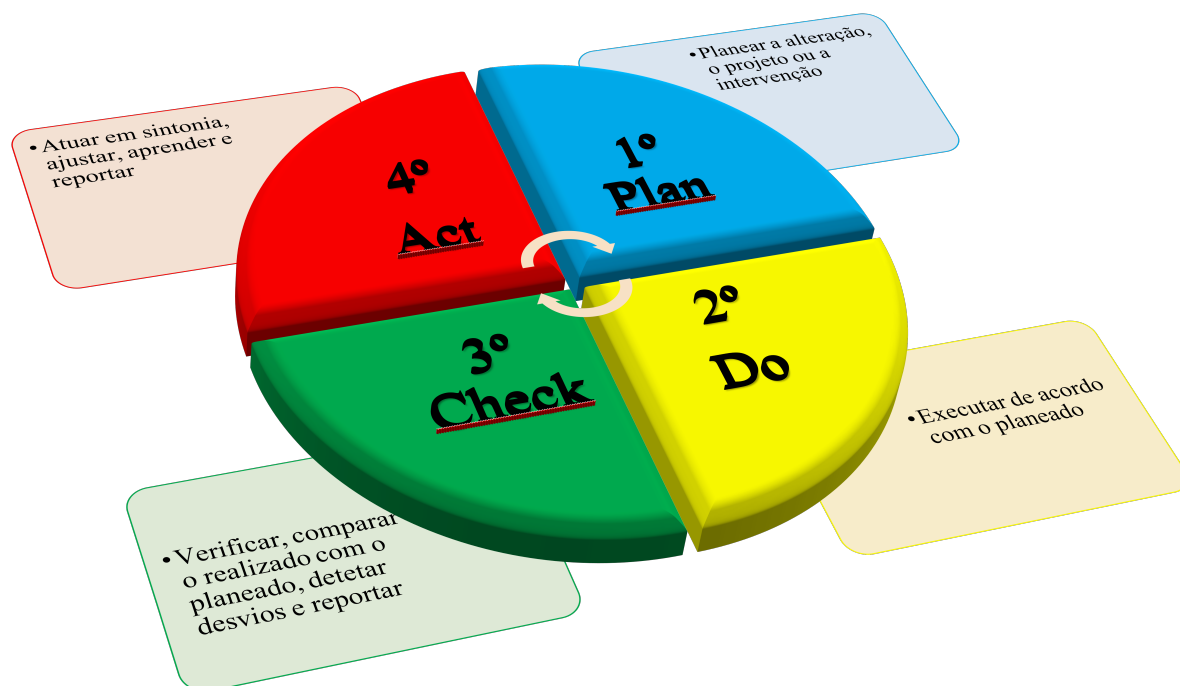


Figura 2.2 – Ciclo de Melhoria contínua PDCA. Adaptado de: Pinto (2013)

#### 2.4.2.2. Melhoria Contínua

O conceito de melhoria contínua há muito que é tido como uma das formas mais eficazes para melhorar o desempenho e a qualidade nas organizações. A melhoria contínua é aplicável a qualquer tipo de organização e, dentro desta, a qualquer setor ou departamento. A manutenção é uma das funções que mais beneficiará com a adoção desta filosofia, dado que a mesma assegurará a qualidade superior dos seus serviços e a implementação de uma cultura de permanente melhoria (Cabral, 2006).

Segundo Pinto (2016), os princípios fundamentais da melhoria contínua são:

- Encarar os problemas como oportunidades;
- Usar a cabeça em vez da carteira;
- Repetir cinco vezes “porquê” até encontrar a causa-raiz do problema;
- Trabalhar em equipa, colaborando e partilhando as boas práticas entre todos;
- Abandonar as ideias preconcebidas, adotar novos paradigmas.

A melhoria contínua deve ser implementada através do trabalho de equipa. É através dos pequenos contributos de várias pessoas em equipa e não do grande esforço de uma só pessoa que se alcançam os grandes resultados. No caso concreto da manutenção, as equipas podem ser compostas por elementos diretamente ligados à manutenção como, preferencialmente, por elementos internos e externos à manutenção.

#### 2.4.2.3. *Os Cinco Porquês (5W)*

Os 5W (*five whys* ou cinco porquês) é uma das ferramentas de melhoria contínua aplicada para descobrir a causa-raiz de um problema. Consiste em perguntar porquê até que a verdadeira causa do problema seja identificada. Em vez de focalizar nos efeitos ou simplesmente considerar as causas aparentes, os 5W incentivam a pesquisa da origem dos problemas para que, depois, sejam apontadas as soluções dos mesmos. Ou seja, em vez de colocar uns “arames” na máquina para resolver a avaria, o que os 5W propõem é perceber a origem do problema e, a partir daí, propor medidas corretivas que definitivamente eliminam o problema (Pinto, 2016).

Na maioria das situações de emergência não haverá tempo para aplicar os 5W, mas isso não significa que posteriormente não se apliquem. Uma correta organização e gestão da manutenção, bem como esforços concertados de uniformização e formalização de procedimentos e práticas de manutenção, libertarão imenso tempo para os processos de melhoria contínua como os 5W.

Segundo Pinto (2016), o procedimento dos 5W é o seguinte:

- 1 – Identificar o problema.
- 2 – Perguntar: “Porque é que aconteceu?” (Identificar todas as causas possíveis).
- 3 – Para cada uma das causas identificadas, pergunte de novo: “Porque é que aconteceu?”.
- 4 – Repetir cinco vezes os passos 2 e 3. No final deverá ter identificado a(s) causa(s)-raiz.

5 – Identifique a solução e as contramedidas para resolver a(s) causa(s)-raiz.

A aplicação dos 5W é muito simples, mas deve ser sempre formal, na Figura 2.3, apresenta-se um exemplo de um documento simples que orienta a sua aplicação.

		<b>Validação e Resolução</b>	
		Responde?	Método a usar
Qual a situação anormal, qual o problema?	<input type="text"/>		
Porque é que isto ocorreu? [EI 1]	<input type="text"/>	sim →	<input type="text"/>
		não ←	
Porque é que isto ocorreu? [EI 2]	<input type="text"/>	sim →	<input type="text"/>
		não ←	
Porque é que isto ocorreu? [EI 3]	<input type="text"/>	sim →	<input type="text"/>
		não ←	
Porque é que isto ocorreu? [EI 4]	<input type="text"/>	sim →	<input type="text"/>
		não ←	
Porque é que isto ocorreu? [EI 5]	<input type="text"/>	sim →	<input type="text"/>
<b>Comentário e Observações</b>	<b>Problema-Raiz</b>		
<input type="text"/>			

Figura 2.3 – Exemplo de um procedimento formal para aplicação dos 5W. Adaptado de Pinto (2016)

### 2.4.3. TPM

A Manutenção Produtiva Total (*TPM – Total Productive Maintenance*) apareceu nos Estados Unidos da América nos finais dos anos 40, início dos anos 50. Este conceito era caracterizado pelo desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva sistemática para melhorar a fiabilidade dos equipamentos. A *TPM* não é mais do que o conceito inicial Japonês modificado e melhorado para se ajustar ao ambiente industrial americano.

De acordo com Cabral (2006), no ano de 1953 um grupo de vinte empresários japoneses juntaram-se para promover a investigação nestas temáticas e, em 1962 deslocaram-se aos Estados Unidos da América para observar a “manutenção produtiva americana”. Esta missão deu origem à criação do *Japan Institute of Plant Engineers (JIPE)*, antecessor do *Japan Institute of Plant Maintenance*, criado em 1969. A Ninppondenso (empresa fornecedora de componentes à Toyota) foi a primeira companhia Japonesa a introduzir a manutenção produtiva nos equipamentos das suas linhas de produção.

O *TPM* é uma filosofia de gestão da manutenção na qual todos são responsáveis pela utilização e manutenção do equipamento. No *TPM* os operadores são encorajados a participarem ativamente na preservação da condição normal de funcionamento dos seus equipamentos, com o objetivo de garantir que o fluxo de produção seja suave e contínuo (Cabral, 2006).

A filosofia *TPM/JIT* encara a manutenção como um processo de suporte que deve preservar o equipamento e ferramentas, ajudar na qualidade dos produtos e serviços, aumentar a participação dos operários e proporcionar redução de custos do processo produtivo. Um sistema *JIT* não poderá funcionar se o equipamento falhar ou se a qualidade dos produtos for penalizada por causa de problemas com equipamentos ou ferramentas.

Segundo Nakajima (1993), fundador do *TPM*, a manutenção produtiva total é levada a efeito por todos os trabalhadores em pequenos processos de grupo. De acordo com os princípios da filosofia *TPM*, a responsabilidade pela melhoria dos equipamentos não reside apenas no departamento de manutenção, mas em todos os trabalhadores.

Para Singh et al. (2013), a manutenção produtiva total tem como objetivo melhorar a produtividade e a qualidade de trabalho juntamente com o aumento da moral dos funcionários e a sua satisfação. É uma abordagem inovadora para a manutenção que melhora o equipamento, elimina falhas e promove a manutenção autónoma por meio de atividade de rotina.

Segundo Cabral (2006), através da *TPM*, são esperados resultados que se podem dividir em tangíveis e intangíveis. Dos tangíveis listam-se:

- Aproximação a zero falhas;
- Fiabilidade das máquinas;
- Diminuição dos tempos de paragem dos equipamentos;
- Aumento da produtividade, tanto das instalações como do pessoal;
- Diminuição dos acidentes de trabalho;
- Diminuição de recursos necessários à produção, como a energia.

Os resultados intangíveis caracterizam-se pelo aumento da motivação dos trabalhadores, a criação de um melhor ambiente de trabalho assim como a melhoria da imagem da empresa (Cabral, 2006).

A implementação da TPM baseia-se em oito princípios caracterizadores, denominados por pilares (Cabral, 2006). Os oito pilares da TPM encontram-se esquematizados na Figura 2.3.

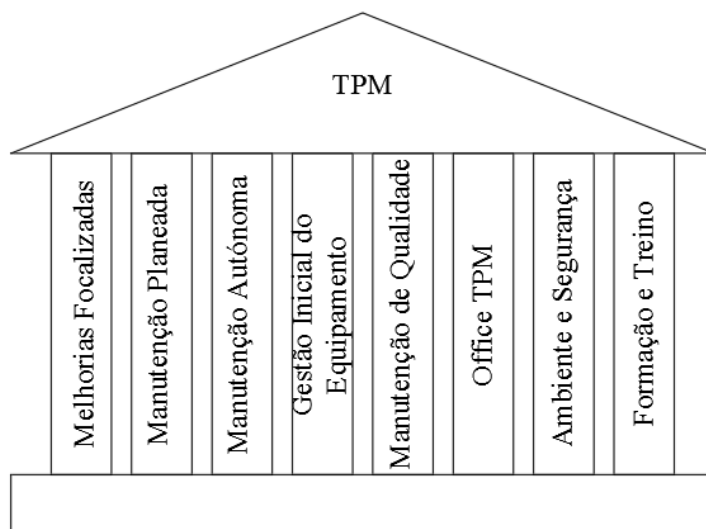


Figura 2.4 - 8 Pilares do TPM. Adaptado de: Pinto (2016)

Cada pilar representa respetivamente (Pinto, 2016; Didelet & Viegas, 2003):

- **P1 – Melhorias Focalizadas (*kobetsu Kai-zen*)** – o conceito de *kobetsu kai-zen* baseia-se em eventos específicos de melhorias em equipamentos e/ou instalações. Também referido como eventos de melhoria contínua, *kobetsu kai-zen* começa por identificar uma área de melhoria onde o impacto seja significativo e o custo/esforço associados à sua implementação sejam menores;
- **P2 – Manutenção Planeada (*keikaku hozen*)** – o objetivo da manutenção planeada é garantir a ausência de falhas nas máquinas e garantir máquinas que não produzem defeitos, para se garantir a total satisfação do cliente. Com a manutenção planeada, os esforços das pessoas são gradualmente encaminhados da abordagem reativa ao método proactivo;
- **P3 – Manutenção Autónoma (*jishu hozen*)** – a manutenção autónoma consiste no envolvimento e comprometimento dos operadores fabris nos processos básicos de manutenção dos seus equipamentos. A manutenção autónoma apoia-se num conjunto de passos que orienta as pessoas a adquirirem autonomia na realização de operações básicas de manutenção (por exemplo, inspeção, lubrificação e pequenas intervenções no equipamento);

- **P4 – Gestão Inicial do Equipamento** – a gestão inicial do equipamento procura, logo nas fases iniciais, trazer para a mesa de decisão as questões associadas à manutenção de sistemas e equipamentos;
- **P5 – Manutenção da Qualidade (*hinshitsu hozen*)** – este pilar procura alcançar um sistema de operações incapaz de produzir defeitos ou erros de qualidade. A manutenção em ambiente TPM tem um grande desafio neste domínio, ao incentivar o trabalho em equipa e a criatividade das pessoas na busca de processos robustos e à prova de problemas;
- **P6 – Office TPM** – à medida que os anteriores pilares forem resultando na melhoria do desempenho de equipamentos e instalações, mais e mais problemas vão ocorrer, fruto da administração da operação. Este pilar usa o conhecimento e as ferramentas aplicadas nos processos de manutenção e de operações nos processos administrativos (*office*);
- **P7 – Ambiente e Segurança** – este pilar garante que as melhorias realizadas pelos anteriores não vão reduzir a segurança, nem a saúde das pessoas, ou mesmo prejudicar o ambiente;
- **P8 – Formação e Treino** – o processo de implementação dos anteriores pilares costuma revelar necessidades de formação e treino juntos de operadores de manutenção, qualidade, produção e outros.

#### 2.4.4. TPM e LCM

Segundo Pinto (2016), o *LCM* é muito mais que uma evolução da filosofia *TPM*, é a adoção de princípios e soluções que visam apoiar a gestão empresarial na eliminação de desperdícios e na criação de valor para o cliente e demais *stakeholders*, adotando uma abordagem global centrada na participação de todos e na constante melhoria da eficiência global do equipamento.

Enquanto a *TPM* é basicamente focalizada no desempenho do equipamento, a *LCM* abrange toda a vertente da gestão da manutenção e processos da mesma.

#### **2.4.5. TPM e RCM**

A característica principal da TPM é o envolvimento dos recursos humanos da Produção nas operações de Manutenção, tendo em conta que o Operador é quem melhor conhece a máquina, estando numa posição que lhe permite criar as melhores condições de prevenção de falhas. Consequentemente, geram-se sinergias entre todas as funções organizacionais da empresa, mais concretamente, entre a Produção e a Manutenção, de forma a aperfeiçoar continuamente a qualidade dos produtos fabricados, aumentar a disponibilidade operacional dos equipamentos e melhorar as condições de segurança dos operadores (Millstein & Martinich, 2014). Neste modelo, pressupõem-se que os Operadores trabalhem em colaboração com o pessoal especializado da Manutenção na deteção e reparação de avarias mais complexas, reduzindo assim os custos indiretos da Função Manutenção e melhorando significativamente os processos produtivos e as mais-valias geradas.

Relativamente à RCM, esta determina uma convergência de objetivos e de esforços da Função Produção e da Função Manutenção, nomeadamente através do seu envolvimento em trabalho de grupo para a identificação das avarias críticas dos equipamentos.

### **2.5. Indicadores de desempenho da manutenção**

#### **2.5.1. OEE**

A partir do aparecimento da filosofia de manutenção TPM, houve a necessidade de desenvolver uma visão integral do sistema produtivo e, para isso, tornou-se fundamental criar uma forma de medir a eficiência da capacidade produtiva. Assim, o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), que mede a utilização efetiva da capacidade dos equipamentos, foi proposto como um indicador que completa essa lacuna na gestão da capacidade produtiva (Busso & Miyake, 2012).

O OEE abrange seis tipos básico de perdas, como pode ser observado na Figura 2.4, estas perdas são agrupadas em três classes, Disponibilidade, Performance e Qualidade. Estas três classes são utilizadas para calcular o OEE, este cálculo é feito através da Equação (1):

$$OEE = D * P * Q \quad (1)$$

Onde,

D – Disponibilidade;

P – Performance;

Q – Qualidade.



Figura 2.5 – Estrutura de perdas do OEE. Adaptado de Busso & Miyake (2012)

O grande objetivo do OEE não é obter o melhor índice, mas sim, obter um índice simples que orienta de forma confiável a tomada de decisão para a utilização dos recursos, sendo importante no processo de melhoria contínua. A partir da análise do OEE em conjunto com a utilização de ferramentas de gestão de qualidade, permite que se consiga identificar as perdas de maior impacto e encontrar o real motivo de ocorrência das mesmas (Busso & Miyake, 2012).

### 2.5.2. Fiabilidade

Segundo a Norma NP EN 13306:2010, define-se fiabilidade como a aptidão que um bem tem em cumprir uma função solicitada em determinadas condições durante um certo

intervalo de tempo. O termo fiabilidade também é utilizado como medida de desempenho podendo assim ser também definido como uma probabilidade.

São de considerar dois conceitos chave, o TBF (*Time Between Failures*) ou Tempo de Bom Funcionamento, que constitui o tempo entre duas avarias consecutivas num determinado equipamento, e o MTBF (*Mean Time Between Failures*) correspondente ao valor médio dos TBF para o equipamento em análise. O inverso do MTBF representa outro conceito importante, a taxa de avarias ( $\lambda$ ) quando esta é constante.

MTBF representa a “esperança matemática” das avarias, ou seja, o tempo espectável ao fim do qual um equipamento, quando usado em condições ditas normais, avaria (Didelet & Viegas, 2003):

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{\sum TBF}{N} \quad (2)$$

Onde:

N – Número de avarias verificadas no período de tempo considerado.

O tempo entre avarias pode ser substituído por outra unidade de contagem, como por exemplo quilómetros, ciclos, horas (Didelet & Viegas, 2003).

O tempo médio mínimo entre falhas ou MTBF mínimo ( $\theta_i$ ), e por isso, correspondente à taxa de falhas máxima, pode ser determinado a partir da equação (3):

$$\theta_i = \frac{2 * T}{\chi^2_{\alpha, 2*(n_f+1)}} \quad (3)$$

Onde:

T – Tempo total de funcionamento;

$n_f$  – Número de falhas.

Para equipamentos não reparáveis, que apresentam uma única falha no seu ciclo de vida útil, utiliza-se o indicador MTTF (*Mean Time To Failure*) ou Tempo Médio até à Falha.

### **Taxa de falhas**

Considera-se falha ou avaria a cessação ou interrupção da capacidade de um bem para realizar a função específica para a qual foi concebido (Pinto, 2016).

As falhas podem ser classificadas tendo em conta vários aspetos, como a sua origem, velocidade, criticidade ou a idade desta.

A taxa de falhas ( $\lambda$ ) representa o número de falhas por unidade de tempo, ou de utilização mais concretamente, uma vez que esta unidade de tempo pode ser por exemplo de avarias/hora no caso de se considerar o funcionamento de uma máquina ou falhas/km no caso de se tratar de um veículo.

$$\lambda = \frac{N}{T} \quad (4)$$

Como já anteriormente referido, o MTBF corresponde ao inverso da taxa de falhas  $\lambda$ :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

A taxa de variação do número esperado de falhas ( $dE[N(t)]$ ) em relação ao tempo  $dt$ , é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \quad (6)$$

Onde:

$N(t)$  – Número de falhas que ocorrem durante o intervalo  $[0,t]$ .

Esta função denominada intensidade, pode também ser referida como taxa de renovação, intensidade de falha, taxa de degradação ou taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate Of Occurrence Of Failures*) (Assis, 2013).

Pode estimar-se o valor de  $\lambda(t)$  através da aproximação representada pela equação (7):

$$\lambda(t) \approx \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} \quad (7)$$

A ocorrência de falhas nos equipamentos segue a esquematização apresentada na figura 2.5 pela curva do tempo médio de falhas ou “curva da banheira”. Este é o padrão de falhas generalista e representa o modo de degradação dos equipamentos ao longo da sua vida útil.

Esta degradação influencia diretamente a taxa de avarias ( $\lambda$ ) ao longo do tempo.

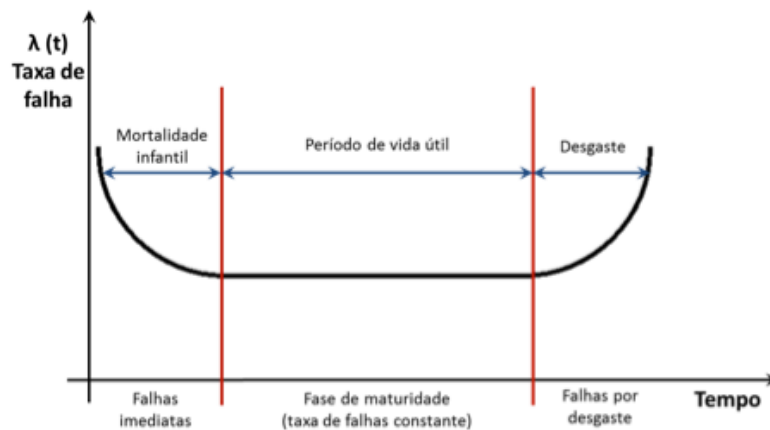


Figura 2.6 – Padrão de falhas ou "Curva da Banheira". Adaptado de: Leão & Andrade (2015)

A curva apresentada na figura 2.5, consiste em três fases distintas:

- **Fase inicial – Mortalidade Infantil** – caracterizada pelas falhas que ocorrem no início de atividade de qualquer equipamento, relacionadas com elementos como problemas de conceção, montagem e instalação, problemas de aplicação e de fabrico. Estas falhas surgem devido ao facto de o equipamento necessitar de se adaptar ao seu ambiente de trabalho;
- **Fase da vida útil** – neste período a taxa de falhas é praticamente constante, assim como a ocorrência de avarias. Este período é caracterizado por uma descida drástica da taxa de falhas, com tendência a estabilizar com o decorrer do tempo. A origem de falhas neste período fica a dever-se, essencialmente, a fatores como excessos de carga e negligência no uso do equipamento ou a causas imprevisíveis (falhas aleatórias). É o período de maior rendimento do equipamento;
- **Fase final – Desgaste (*wear out*)** – esta fase adivinha o final do equipamento e é acompanhada pelo aumento do número de falhas do mesmo. Desgaste e corrosão são algumas das causas mais comuns nesta fase.

Didelet & Viegas (2003) consideram que a primeira fase desta curva já não é observada pelo facto de muitos equipamentos hoje em dia já chegarem aos utilizadores testados e rodados com o intuito de eliminar esta fase de “mortalidade infantil”.

### 2.5.3. Manutibilidade

Segundo a Norma NP EN 13306:2010, define-se manutibilidade como a aptidão que determinado bem possui, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de forma a cumprir uma função solicitada, quando a manutenção é realizada utilizando procedimentos e recursos pré-estabelecidos.

Consideram-se os seguintes conceitos base, o TTR (*Time To Repair*) ou Tempo Total de Reparação correspondente ao tempo entre o momento em que se deteta a avaria e o momento em que o equipamento volta às suas condições normais de trabalho após ser reparado, e o MTTR (*Mean Time To Repair*) correspondente ao valor médio dos TTR para o equipamento em análise.

O MTTR representa a “esperança matemática” do tempo de reparação de uma dada avaria, ou seja, o tempo espectável ao fim do qual um equipamento se considera reparado (Didelet & Viegas, 2003), e pode ser calculado pela equação (8):

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} \quad (8)$$

O conceito de TTR inclui os seguintes tempos (Cabral, 2006; Didelet & Viegas, 2003):

- Tempo de espera;
- Tempo gasto na deteção da avaria;
- Tempo de diagnóstico da avaria;
- Tempo de acesso ao componente avariado;
- Tempo de espera para o fornecimento da nova peça;
- Tempo de substituição ou reparação;
- Tempo de montagem;
- Tempo de controlo e arranque do equipamento.

De acordo com Pinto (2016) são vários os métodos que podem ser adotados com vista à melhoria da manutibilidade. Estes métodos podem passar por reduzir o tempo de deteção e localização de avarias, com a aposta em instrumentos de medida, de meios auxiliares de diagnóstico e numa boa documentação de apoio e reduzindo o tempo de reparação, aperfeiçoando os acessos aos componentes de substituição, e aumentando a facilidade de desmontagem e montagem destes.

## Taxa de Reparação

A taxa de reparação  $\mu$  pode ser definida como o inverso do MTTR e é calculada pela equação (9):

$$\mu = \frac{N_r}{T_r} \quad (9)$$

Onde:

$N_r$  - Número de reparações

$T_r$  - Tempo total de reparação

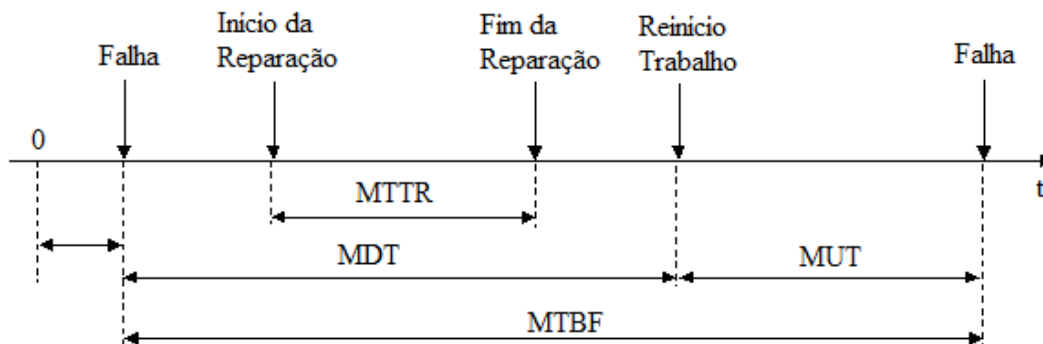


Figura 2.7 – Indicadores de Manutenção.

Outros conceitos a reter são os de MDT (*Mean Down Time*) ou média dos tempos de paragem, correspondente ao tempo em que o equipamento se encontra indisponível para assegurar a função para a qual foi concebido. E o MUT (*Mean UP Time*) ou média do tempo de funcionamento, que corresponde ao tempo em que o equipamento se encontra disponível para assegurar a mesma função. Na figura 2.6 encontram-se esquematizados os indicadores MTBF, MTTR, MDT e MUT.

O MDT pode ser afetado por fatores como a dimensão da avaria, o tempo de reação dos serviços de manutenção, a logística de apoio e o tempo para o fornecimento de nova peça. O MUT é interrompido por fatores como a ocorrência da falha e pelo próprio trabalho no equipamento.

#### 2.5.4. Disponibilidade

Segundo a Norma NP EN 13306:2010, define-se disponibilidade como a aptidão de um bem para assumir a função pela qual foi concebido sob determinadas condições, num dado instante ou intervalo de tempo, tendo em conta que se encontra assegurado o fornecimento dos recursos externos necessários.

Pinto (2016), define a disponibilidade como sendo a probabilidade que uma máquina tem de assegurar a função para a qual foi projetada e produzida, num determinado período de tempo. A disponibilidade exprime-se matematicamente pela equação (10):

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (10)$$

Sendo esta a expressão da Disponibilidade é de conclusão imediata de que as duas formas de a aumentar será através, do aumento do valor do MTBF ou da diminuição do MTTR (Didelet & Viegas, 2003). A disponibilidade está dependente da fiabilidade e da manutibilidade. Aumentar a disponibilidade implica aumentar a fiabilidade dos equipamentos e reduzir a duração das intervenções, objetivo dos serviços de manutenção.

A diminuição do MTTR pode passar por suprimir algumas parcelas de tempo que compõe o TTR como o tempo de espera por indisponibilidade de técnicos, equipamentos ou ferramentas, o tempo de espera pelo fornecimento de peças assim como a eliminação de outros tempos improdutivos (Didelet & Viegas, 2003).

A disponibilidade depende (Pinto, 2016):

- Do número de avarias → Fiabilidade;
- Da rapidez com que as avarias são reparadas → Manutibilidade;
- Do tipo de manutenção → Manutenção;
- Da quantidade dos meios à disposição → Logística;
- Da sua interdependência.

## 2.6. Abordagem *Lean* na Manutenção

A designação *Lean Thinking* (em português, pensamento “magro”), enquanto um conceito de liderança e de gestão empresarial, foi primeiramente referida por *James*

*Womack e Daniel Jones* em 1996, na obra dos dois autores com o mesmo nome (Pinto, 2009). Trata-se de uma filosofia de gestão que tem por objetivo a eliminação sistemática de desperdícios e a criação de valor. Os dois autores referem-se ao *Lean Thinking* como o “antídoto para o desperdício” sendo que o desperdício diz respeito a todos os processos que não acrescentem valor.

Esta filosofia, sendo essencialmente de gestão e de processos, alcançou uma enorme reputação mundial, havendo casos de aplicação do *Lean* em todas as áreas de atividade económica, desde organizações com fins lucrativos ao setor público, sendo possível encontrar aplicações *Lean* em organizações não-governamentais e sem fins lucrativos.

Houve uma evolução da filosofia *Lean* desde os seus primórdios (década de 90), muito devido aos percursores do *Lean* e às empresas que serviram de referência e foram implementando a filosofia nos mais diversos setores de atividade.

O *Lean Thinking* tem a sua origem, como já foi referido, no sistema de produção da *Toyota (TPS)* criado por Taiichi Ohno em 1988, que foi inicialmente aplicado no setor da indústria automóvel (Pinto, 2009).

De acordo com Melton (2005), a filosofia *Lean* apoia-se num conjunto de ferramentas que são utilizadas em diversas áreas de uma organização, destacando-se as seguintes ferramentas:

- *Kanban* – sinal visual que permite suportar o fluxo de trabalho puxando o produto através da linha de produção conforme necessário;
- *5S* – ajuda visual e de organização que permite manter da melhor forma o espaço de trabalho;
- *TPM* – ferramenta que permite uma maior ligação entre produção e manutenção;
- Gestão visual – método de medir o desempenho de uma linha de produção disponível para os operadores consultarem a qualquer altura;
- *SMED* – técnica que permite reduzir o tempo de setup dos equipamentos.

### **2.6.1. Os princípios do *Lean Thinking***

Os autores criadores desta filosofia (Womack & Jones, 1996) identificaram cinco princípios do *Lean Thinking* (Pinto, 2009):

- I. **Criar valor** – é importante definir valores e não apenas o valor; isto porque uma organização não se deve limitar a satisfazer apenas o seu cliente sob pena de não ter um futuro muito próspero. Com esta nova abordagem de direcionar valores para todas as partes interessadas (colaboradores, acionistas, sociedade), muitos dos processos que anteriormente eram classificados como desperdício são agora classificados como valor acrescentado. Exemplos disto são empresas que apostam em formação contínua para os seus colaboradores e mostram ter responsabilidades sociais para criar valor para todas as partes.
- II. **Definir a cadeia de valor** - a organização necessita de satisfazer simultaneamente todos os *stakeholders*, entregando-lhes valor, daí ser natural definir para cada parte interessada a respetiva cadeia de valor. Nenhuma se deverá sobrepor às demais e a empresa deverá, sempre que possível, procurar o equilíbrio de interesses;
- III. **Otimizar o fluxo** – procurar sincronizar os meios envolvidos na criação de valor para todas as partes. Fluxos de materiais, de pessoas, de capital e de informação;
- IV. **Sistema *pull*** – este sistema *pull* aparece em oposição ao anterior sistema *push*<sup>2</sup> em que se produzia sempre para *stock*. No sistema *pull* apenas se produz o necessário, quando necessário. É uma ótica de *just-in-time* ao invés de *just-in-case*;
- V. **Perfeição** – saber que os interesses, as necessidades e as expectativas das diferentes partes interessadas estão em constante evolução. Deve ser incentivada a melhoria contínua a todos os níveis da organização, ouvindo constantemente as necessidades e expectativas do cliente e procurando ser rápido, permitindo assim às organizações melhorar constantemente.

Estes princípios foram colocados numa sequência tal que a sua realização poderá servir como *roadmap* para a implementação do pensamento *Lean* nas organizações, no entanto, os cinco princípios de *Womack e Jones* apresentam algumas lacunas. Consideram apenas a cadeia de valor para o cliente, todavia, numa organização existem várias cadeias de valor, uma para cada parte interessada, pelo que o desafio não está apenas na criação de valor, mas sim, na criação de valores. Outra limitação dos cinco princípios iniciais é que

---

<sup>2</sup> Sistema *push* – sistema de produção com uma ótica de produzir para encomenda, ao contrário do sistema *pull*.

estes tendem a levar as organizações a entrar em ciclos infundáveis de redução de desperdícios, ignorando o processo crucial de criar valor através da inovação dos seus produtos, serviços e tarefas (Pinto, 2009).

### **2.6.2. Metodologia *Lean***

A filosofia *Lean*, tem como base a implementação de vários métodos que auxiliam na identificação dos desperdícios existentes e soluções de melhoria num sistema produtivo ou de manutenção.

O grande objetivo da filosofia *Lean Manufacturing* (Produção Magra) consiste na eliminação das sete grandes perdas associadas aos processos produtivos (Cabrita, 2009):

- Produção em excesso, ou seja, que ultrapassa o volume de encomendas;
- Tempos de espera, entre as várias etapas de produção;
- Transporte desnecessário de produtos fabricados e de matérias-primas e ferramentas, entre os vários locais de fabricação;
- Processamento defeituoso, contribuindo para um reprocessamento e eventualmente, para a quebra de confiança dos clientes;
- Existência de *stocks* em excesso, no que respeita tanto aos produtos fabricados como aos materiais de manutenção, obrigando a perdas de tempo no armazenamento e no processamento administrativo e logístico, e à existência de armazéns sobredimensionados face às necessidades;
- Movimentações desnecessárias por parte dos recursos humanos;
- Fabricação de produtos sem qualidade devida à fraca formação dos operadores dos equipamentos, e à ausência de especificações técnicas.

A metodologia *Lean Manufacturing* integra nos seus processos a filosofia Manutenção Magra (*Lean Maintenance*) que, obedecendo aos mesmos princípios, tem como objetivo a otimização da eficiência global, a promoção da melhoria contínua, o aumento da fiabilidade e da disponibilidade dos equipamentos e atingir a meta “zero falhas”, o que conduz a um aumento da produtividade, da competitividade e da qualidade dos produtos e à redução significativa dos custos diretos e indiretos, associados à Função Produção e à Função Manutenção.

A metodologia *Lean Maintenance* utiliza simultaneamente as metodologias de planeamento associadas à Manutenção Produtiva Total (*TPM*) e as estratégias de deteção e controlo de falhas inerentes à Manutenção Centrada na Fiabilidade (*RCM*), referidas anteriormente.

De um modo geral, a filosofia *Lean Maintenance* apoia-se nos seguintes princípios:

- Utilização dos modelos principais de manutenção *TPM* e *RCM*;
- Melhoria da eficiência global dos equipamentos e das linhas de produção;
- Melhoria da eficiência dos ativos, materiais e humanos;
- Utilização da metodologia *5S*;
- Definição normalizada das atividades de manutenção;
- Circulação da informação técnica e administrativa em tempo real, de preferência em suporte informático;
- Utilização da metodologia *Poka-Yoke*, que consiste em criar procedimentos isentos e à prova de erros.

A aplicação conjugada das políticas de manutenção industrial que foram descritas, com a filosofia *Lean Maintenance* conduz a resultados de exploração caracterizados por uma melhoria contínua, com uma permanente otimização da eficiência dos ativos.

Esta metodologia é derivada do Sistema de Produção *Toyota* (*TPS – Toyota Production System*) e baseia-se em cinco grandes ferramentas de gestão (Cabrita, 2009): *Kaizen*, *5S*, *Six Sigma*, *Kanban*, *Just in Time*.

#### 2.6.2.1. *Kaizen*

O *kaizen* visa o bem não só da empresa, mas também dos seus recursos humanos, que se sentirão motivados, contribuindo assim para uma maior produtividade, na medida em que são incentivados a colaborar diretamente no processo produtivo, apontando novas soluções e técnicas que melhorem os processos, reduzindo os desperdícios (Pinto, 2009). Esta técnica permite igualmente definir as linhas orientadoras para os operadores dos equipamentos e serve, para as chefias, como um barómetro de avaliação do desempenho dos ativos.

#### 2.6.2.2. 5S

O Programa 5S, também conhecido como “*housekeeping*”, é uma técnica reorganizadora das empresas e geralmente associada à técnica *Kaizen*, que foi desenvolvida com o objetivo de transformar o ambiente das organizações e as atitudes das pessoas.

O conceito básico desta metodologia consiste na qualidade de vida e de condições de trabalho dos recursos humanos, o que resulta numa maior produtividade obtida com maior qualidade. O Programa 5S surgiu das iniciais de cinco palavras de origem japonesa, *Seiri*, *Seiton*, *Seiso*, *Seiketsu* e *Shitsuke*, que têm os seguintes significados (Delisle & Freiberg, 2014):

**1º *Seiri*** (sentido de organização) – separar o útil do inútil, identificar coisas desnecessárias no posto de trabalho;

**2º *Seiton*** (sentido de arrumação) – definir um local para cada coisa, verificar que cada coisa está no seu local, colocar à mão as coisas de uso mais frequente, colocar etiquetas de identificação (ajudas visuais) nas coisas e no respetivo lugar onde estas devem ser mantidas;

**3º *Seiso*** (Sentido de limpeza) – dividir o posto de trabalho e atribuir uma zona a cada elemento do grupo; proceder à limpeza em cada zona do posto de trabalho, assim como da área envolvente; definir uma norma de limpeza para essa zona do posto de trabalho;

**4º *Seiketsu*** (sentido de normalização) – definir uma norma geral de arrumação e limpeza para o posto de trabalho; identificar as ajudas visuais e procedimentos, normas de arrumação e limpeza que resultem/functionem. Normalizar em toda a manutenção os equipamentos/postos de trabalho do mesmo tipo;

**5º *Shitsuke*** (sentido de autodisciplina) – objetivos: praticar os princípios de organização, sistematização e limpeza; eliminar a variabilidade, isto é, fazer sempre bem à primeira; estabelecer procedimentos de controlo visual. Verificar se está tudo no seu lugar; verificar o estado de limpeza; verificar se as ações e inspeções estão a ser realizadas corretamente; desenvolver um sistema do tipo lista de verificação (*checklist*) e de ajudas visuais, incluindo: cores, luzes, indicadores de direção ou gráficos.

#### 2.6.2.3. *Six Sigma*

O *Six Sigma* é aplicável em processos, produtos e serviços, com o objetivo de reduzir falhas e custos de produção, baseando-se num forte sentido de disciplina e na melhoria contínua. O *Six Sigma* pretende atingir a meta “zero defeitos” através da prevenção de defeitos com base em ferramentas estatísticas. Neste sentido, avaliando as falhas ou defeitos de determinado processo industrial, de uma forma sistemática, é possível discernir quais os procedimentos de prevenção a adotar para se eliminar essas falhas. Assim, esta metodologia focaliza-se na eliminação de desperdícios e na redução de defeitos, assim como na redução da variabilidade dos processos, recorrendo ao desvio padrão (Srebrenkoska, Kochov & Minovski, 2016).

#### 2.6.2.4. *Kanban*

O procedimento *Kanban* é utilizado para descrever um sistema de sinalização muito simples, que autoriza a produção em cada célula de trabalho, a partir das operações a realizar a jusante. Os cartões *Kanban* permitem estabelecer um controlo direto entre células de fabrico, limitando o volume de produção em curso (Millstein & Martinich, 2014).

#### 2.6.2.5. *Just in Time*

*Just in Time* é a mais conhecida e utilizada técnica de *Lean Production* e representa uma filosofia de gestão que procura continuamente eliminar qualquer tipo de desperdício. O *Just in Time* é uma técnica que permite ter “o material necessário, no lugar certo, na quantidade exata e no tempo pretendido”, permitindo aumentar o volume de produção, aumentar o número de encomendas com os mesmos ativos, reduzir os desperdícios, atrasos e tempos de espera e, por conseguinte, reduzir os custos de produção, melhorar a qualidade dos produtos fabricados, libertar os ativos, aumentar as margens de lucro, reduzir os preços de comercialização e aumentar a produtividade (Millstein & Martinich, 2014).



### 3. Teoria das Restrições

Teoria das Restrições, também designada por Teoria dos Constrangimentos (TOC – *Theory of Constraints*), é uma metodologia de melhoria contínua, desenvolvida pelo físico israelita *Eliyahu Goldratt*, que introduz uma nova perspectiva no modo como a gestão de processos, dentro de um sistema, deve ser executada de modo a atingir uma máxima eficiência (Sproull, 2009).

De acordo com esta abordagem, qualquer sistema (equipamento, recurso humano, departamento, organização) tem pelo menos uma restrição. Logo, a melhoria do desempenho do sistema não pode ser obtida através de uma melhoria *ad-hoc*<sup>3</sup> de um qualquer elemento constituinte do sistema, mas sim pela melhoria do desempenho da sua principal restrição, devendo todo o sistema operar ao ritmo deste. Ou seja, é o mais fraco do sistema que limita o seu desempenho (Goldratt & Cox, 2004; Taylor & Asthana, 2016).

No entanto, a existência de restrições não representa algo negativo, mas sim uma oportunidade de melhoria. Como a restrição determina o desempenho do sistema, a sua melhoria através de um processo de eliminação ou de redução traduz-se diretamente num aumento do desempenho no sistema (Şimşit, Günay & Vayvay, 2014).

Definido o objetivo de cada organização, a TOC concentra todos os seus esforços em promover melhorias que se traduzam diretamente nesse objetivo, e inevitavelmente, no aumento do desempenho global da organização, sendo essas melhorias efetuadas em pontos fulcrais do sistema (Watson, Blackstone, & Gardiner, 2007).

Tendo um sistema inúmeros processos passíveis de ser melhorados, a falta de tempo, recursos ou disponibilidade financeira tornam necessário focar as ações nos elementos que ditam o resultado das organizações – as restrições – devendo o sistema funcionar em função das mesmas (Cox & Schleier, 2010).

---

<sup>3</sup> *Ad-hoc* significa “para esta finalidade”, “para isso” ou “para este efeito”. É uma expressão latina, geralmente usada para informar que determinado acontecimento tem caráter temporário e que se destina para aquele fim específico.

### 3.1. Conceito e Tipos de Restrições

De acordo com esta abordagem qualquer sistema tem um objetivo final e a melhoria do desempenho global é realizada tendo por base um conjunto de premissas, tais como:

- Um sistema pode ser descrito como uma série de eventos interdependentes sujeitos a flutuações, de tal forma que o desempenho global do sistema em cada momento é sempre limitado por uma série de fatores, denominados de estrangulamentos (*bottleneck*) (Escobar et al, 2015). De acordo com esta abordagem, o desempenho máximo do sistema é obtido quando esses estrangulamentos são usados na sua máxima eficiência (Gupta et al, 2010; Naor et al, 2013);
- Qualquer sistema tem um objetivo que é definido pelos seus *stakeholders*, é mensurável e está sujeito a um conjunto diverso de requisitos a satisfazer tais como ambientais, segurança no trabalho, custos, prazos entre outros. Para o sistema manter o seu normal funcionamento, estas condições têm de ser cumpridas pois representam as necessidades dos clientes e dos recursos envolvidos na prestação do serviço aos clientes (Taylor & Asthana, 2016; Šukalová & Ceniga, 2014);
- As Restrições dos sistemas podem ser de dois tipos, físicas ou políticas. As primeiras são geralmente mais fáceis de identificar e de modificar, as últimas mais difíceis. A eliminação destas últimas, contudo, poderá resultar numa melhoria mais alargada que das primeiras. A Figura 3.1, ilustra os tipos de restrições em função da sua origem (interno/externo) em relação ao sistema (Goldratt & Fox, 1986; Sproull, 2009);
- Num sistema, a solução ótima não é a soma de ótimos locais, ou seja, a otimização individual das partes constituintes de um sistema, não resulta num sistema globalmente otimizado (Naor et al, 2013);
- As soluções ótimas tendem a degradar-se à medida que a envolvente do sistema muda;
- A fim de maximizar o desempenho do sistema, o elo mais fraco deve ser melhorado e todos os outros elementos devem ser ajustados para a velocidade do elo mais fraco (Šukalová & Ceniga, 2014);

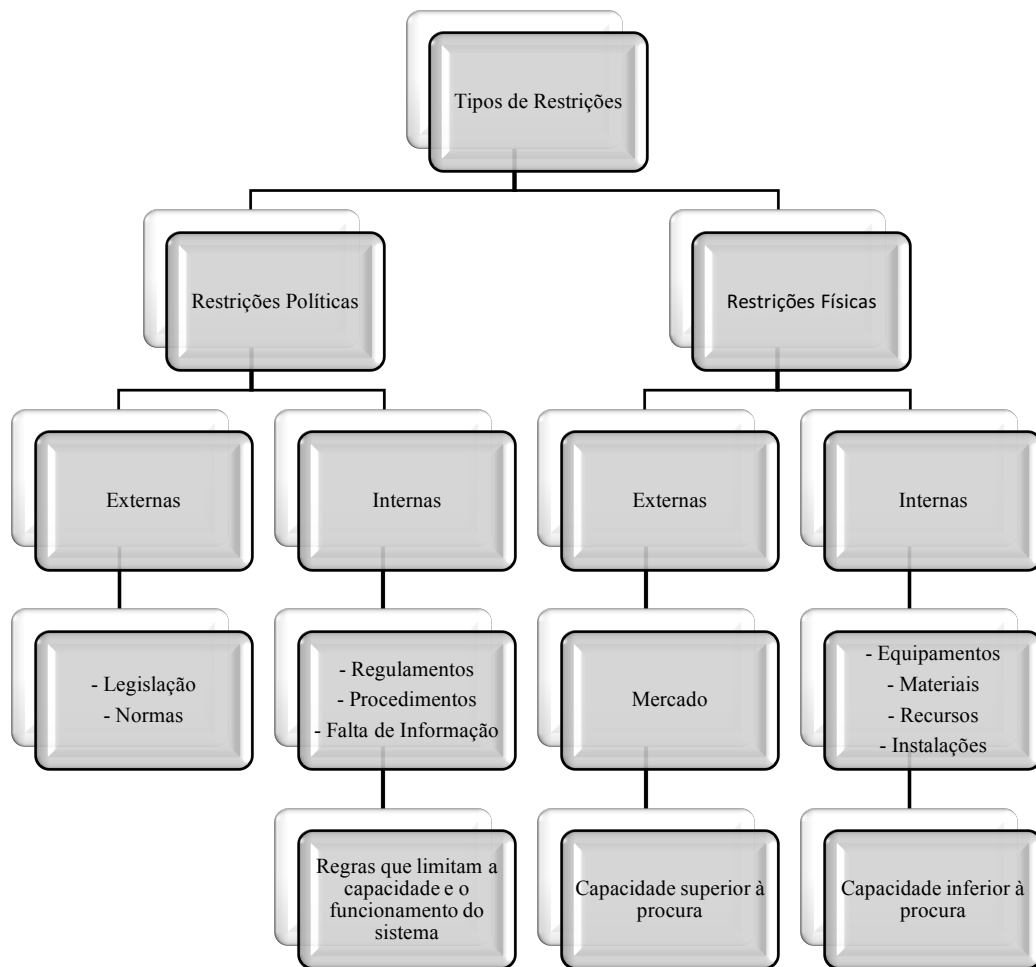


Figura 3.1 – Tipos de Restrições.

- A fim de maximizar o desempenho do sistema, o elo mais fraco deve ser melhorado e todos os outros elementos devem ser ajustados para a velocidade do elo mais fraco (Šukalová & Ceniga, 2014);
- Saber o que mudar em qualquer sistema, requer o conhecimento da sua realidade e do seu objetivo, assim como da direção e magnitude da diferença entre os dois;
- Em qualquer sistema, muitos dos efeitos indesejáveis não passam de sintomas ou problemas causados por um número substancialmente reduzido de problemas fundamentais, interligados e sustentados por conflitos de difícil identificação;
- A solução de um problema fundamental elimina, simultaneamente, os seus efeitos indesejáveis, enquanto a eliminação de um ou mais efeitos não elimina o problema (Cox & Schleier, 2010);
- As soluções tendem a criar “massas” próprias, responsáveis pela criação de resistências a novas alterações, logo a inércia tem de ser combatida.

Uma restrição interna indica que o elo mais fraco do sistema está localizado dentro da organização. Neste grupo, as restrições físicas são as mais fáceis de localizar e ultrapassar, pois o seu efeito pode ser constatado fisicamente através de observação direta ou em discussões com os operadores. Este tipo de restrição afeta diretamente a capacidade do sistema, definida como a quantidade de *output* que um sistema pode realizar por unidade de tempo (Roldão & Ribeiro, 2007). Goldratt, alerta, no entanto, para o facto de geralmente as organizações terem poucas restrições físicas e muitas políticas.

Uma restrição política pode ser a indicação para a utilização de lotes de produção de dimensão elevada de modo a aumentar a eficiência de produção, mas mais dispendiosos devido aos tempos de processamento maiores, resultando na perda de flexibilidade e aumento de inventários. As restrições políticas podem ser qualquer característica externa (exemplo de Legislação e Normas, que possam sofrer alterações repentinas) ao negócio que entre em conflito com os objetivos da organização e impeçam o sistema de atingir a sua capacidade potencial.

De acordo com a abordagem defendida pela TOC, ao invés de se balancear a capacidade de uma fábrica com a procura do mercado, a regra deve ser balancear a cadência com a procura. Quem define a cadência da organização, o ritmo dos processos, é a sua restrição principal também denominada de recurso limitante ou *bottleneck*. A ideia é fazer com que o fluxo sobre a restrição principal seja igual à procura do mercado. Os restantes elementos necessitam de ter capacidade extra. Para fazer face a estas características Goldratt e Cox (2004) definem assim dois tipos de recursos:

- **Recurso Restritivo/Limitante (Restrição Principal)** – qualquer recurso, cuja capacidade é igual ou inferior à procura colocada sobre ele. É o recurso que comanda o processo, o mais lento.
- **Recurso Não-Restritivo** – qualquer recurso que tenha capacidade superior à procura colocada sobre ele.

Por definição, os recursos não-restritivos têm capacidade extra, isto é, perfazem a procura mais rapidamente que os recursos limitantes. Se produzirem durante essa capacidade extra, a consequência será o acumular das existências em frente às restrições principais, pois estas não conseguem corresponder. O nível de utilização de um recurso, não-restritivo, não é determinado pelo seu potencial, mas pela principal restrição do sistema. Em produtos cujo fluxo de produção não passe por recursos limitantes, os recursos não-

restritivos só devem produzir o que a procura conseguir absorver, pois a sua restrição está no mercado (Goldratt & Cox, 2004).

### **Classificação dos tipos de restrições**

As restrições podem ser classificadas como restrição de mercado, restrição de capacidade, restrição política, restrição de matéria-prima, restrição logística, restrição comportamental e restrição administrativa. Estas restrições são brevemente explicadas da seguinte maneira:

**Restrição de mercado** – Esta é uma restrição externa que tem muitas causas, mas geralmente surge da política administrativa. A estratégia, para eliminar a restrição do mercado, está a tentar aumentar a procura pelos produtos. O aumento da procura por produtos pode ser alcançado, através do ganho de vantagem competitiva, o que significa melhorar o processo de produção. Então, o rendimento irá aumentar enquanto que as ações e despesas correntes diminuem;

**Restrição de capacidade** – Ocorre como resultado da falta de recursos específicos para responder à procura de mercado. A restrição de capacidade é um fator que quebra o fluxo de produção e causa uma diminuição na receita de vendas, como resultado de não responder à procura do mercado. Restrições de capacidade podem ser recursos de estrangulamento ou não;

**Restrição política** – Em geral, verifica-se nos departamentos de marketing, contabilidade e finanças. É difícil identificar e eliminar, mas uma vez que é realizado, contribui mais para as empresas;

**Restrição de matéria-prima** – Esta restrição ocorre como resultado da falta de matéria-prima no processo de manutenção. A fim de superar as restrições de matérias-primas, é necessário procurar novos fornecedores ou a quantia paga aos fornecedores deve ser superior;

**Restrição logística** – O motivo desta restrição pode passar pelo sistema de gestão ou pelo controlo da empresa. Os atrasos nos fornecimentos, sob provisão e não enviar as matérias-primas à manutenção, podem ser dados como um exemplo destas restrições que impedem as empresas de aumentar os seus lucros;

**Restrição comportamental** – Estas não são os principais motivos dos problemas na empresa, mas é difícil eliminá-las. Estas restrições são obstáculos para que se consiga melhorar o processo de manutenção;

**Restrição administrativa** - Ocorre como resultado das decisões negativas dos responsáveis e é difícil eliminá-las. Para eliminar, as empresas devem estar abertas às inovações.

### **3.2. Melhoria Contínua**

Para melhorar o desempenho do sistema é necessário reforçar o seu elo mais fraco, a sua restrição, pois é este o elemento que limita o desempenho global do mesmo. Uma vez aperfeiçoado o elo mais fraco, outro elo poderá surgir como restrição do sistema. O processo de melhoria é assim iterativo e contínuo, e não uma tentativa única (Gupta et al., 2010; Roldão & Ribeiro, 2007).

Segundo Goldratt & Cox (2004), o processo de melhoria contínua é realizado através de 5 passos:

**1º Passo** – IDENTIFICAR a restrição(ões) do sistema;

**2º Passo** – Decidir como EXPLORAR a restrição do sistema;

**3º Passo** – SUBORDINAR o resto do sistema ao passo anterior;

**4º Passo** – ELEVAR a principal restrição do sistema;

**5º Passo** – Se no passo anterior a restrição for quebrada, voltar ao 1º Passo.

Na Figura 3.2, é representado um esquema referente ao ciclo de melhoria contínua da Teoria das Restrições.



*Figura 3.2 – 5 Passos da Melhoria Contínua*

Escobar et al (2015), explica estes 5 passos da seguinte maneira:

### **1º Passo**

A TOC considera uma restrição como qualquer área, processo ou elemento específico de um sistema, que impede que o seu desempenho seja aumentado e o seu objetivo seja alcançado. Tipicamente, os fatores que atuam em qualquer momento como um número de restrição, ou apenas um ou apenas alguns. Essas restrições podem ser externas (de fornecedores ou clientes) ou internas. Estes últimos são de dois tipos: físico, quando se deve à falta de recursos, e políticos, quando provocados por procedimentos ou políticas ineficientes. Para identificar restrições, o TOC começa identificando um número de EIs.

### **2º Passo**

O objetivo nesta fase é maximizar a eficiência da restrição atual, concentrando esforços na eliminação de atividades envolvendo desperdício ou perda de tempo na restrição. Nessa fase, as ações geralmente se concentram em fazer alterações organizacionais nesses procedimentos e políticas que não implicam nenhum gasto econômico. O objetivo é aproveitar ao máximo o potencial do estrangulamento, embora isso seja geralmente insuficiente para eliminar a restrição.

### **3º Passo**

Esta fase implica sincronizar as operações em outros processos ou elementos do sistema que não sejam do estrangulamento, para que não provoquem qualquer retrocesso no uso da restrição. Como na etapa anterior, isso geralmente envolve alterações nas políticas e procedimentos sem incorrer em despesas adicionais significativas.

### **4º Passo**

Se os passos 2 e 3 são insuficientes para eliminar a restrição, então a solução é aumentar o potencial do estrangulamento, que foi realizado neste caso. Esta ação envolve incorrer em despesas e fazer um investimento.

### **5º Passo**

Se a restrição desaparecer como resultado das etapas anteriores, será necessário retornar ao passo 1, porque, sem dúvida, outra restrição irá sobressair dentro ou fora do sistema. Do mesmo modo, também é necessário prestar atenção e evitar que o sistema volte à configuração anterior devido à inércia, que é extremamente comum em todos os sistemas.

Segundo Reid (2007), um dos pontos fortes da TOC, ao contrário de outras abordagens de melhoria que tendem a otimizar o desempenho em cada área do sistema (como TQM, *Six Sigma* e *Lean*), é que ele se baseia no pensamento sistêmico, concentrando esforços de melhoria em componentes críticos do sistema.

Segundo Gupta et al. (2010) o ciclo de melhoria da TOC pode ser aplicado a qualquer processo, nas mais diferentes organizações e em qualquer nível de gestão, contudo, os seus melhores resultados derivam de três ações:

- 1 – Compreender as interdependências entre e através dos processos utilizados para entregar o produto ou o serviço ao cliente;
- 2 – Compreender o impacto dessas interdependências e a variabilidade do processo no desempenho geral do sistema;
- 3 – Para um desempenho previsível e consistente, é necessário usar reservas (buffers) apropriados às interdependências e variabilidade dos processos.

### 3.3. Ferramentas da TOC

A TOC é vista como uma filosofia de gestão, onde o sistema é gerido de uma perspetiva global. A melhoria contínua é obtida a partir da gestão das interações dos elementos do sistema, onde o desempenho individual de cada membro é definido tendo em conta a restrição do sistema principal, também chamado de elo mais fraco.

Segundo Tenera e Abreu (2008) a TOC inclui várias ferramentas que podem ser classificados como mostra a Figura 3.3:

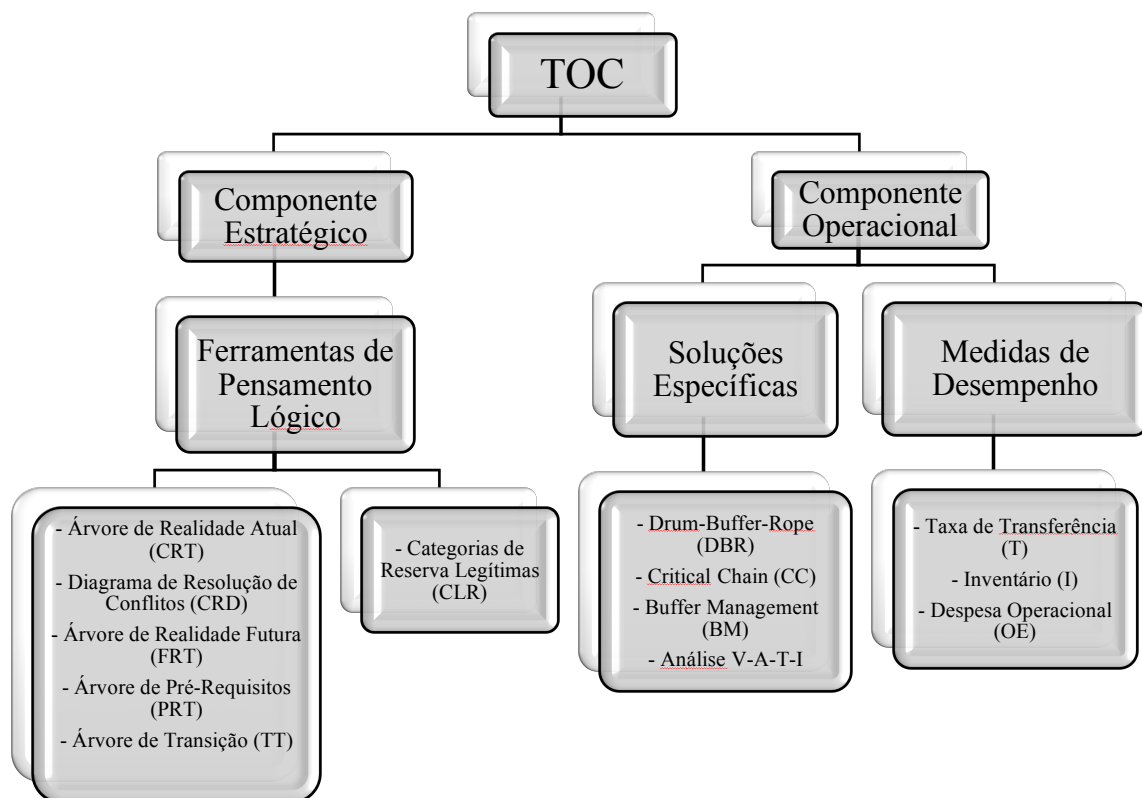


Figura 3.3 – Esquema de Elementos TOC. Adaptado de: Tenera & Abreu (2008)

Estas ferramentas, são divididas em dois grupos, as ferramentas de componente estratégico e as de componente operacional, estes grupos, dividem-se depois em mais subgrupos. Estas ferramentas podem ser descritas da seguinte maneira:

### 3.3.1. Ferramentas de Pensamento Lógico

Para que se consiga melhorar um sistema é necessário realizar algumas alterações, mas nem todas as alterações podem significar melhorias. Para controlar este facto vários autores como McMullen (1998), Izmailov (2014) and Taylor, L. e Asthana, R. (2016) sugerem que um processo de melhoria contínua é inspirado em três questões:

- 1 – O que mudar?
- 2 – Para o que mudar?
- 3 – Como mudar?

Segundo Talyuli et al (2010), estas três perguntas podem ser respondidas através das ferramentas apresentadas na Figura 3.4:

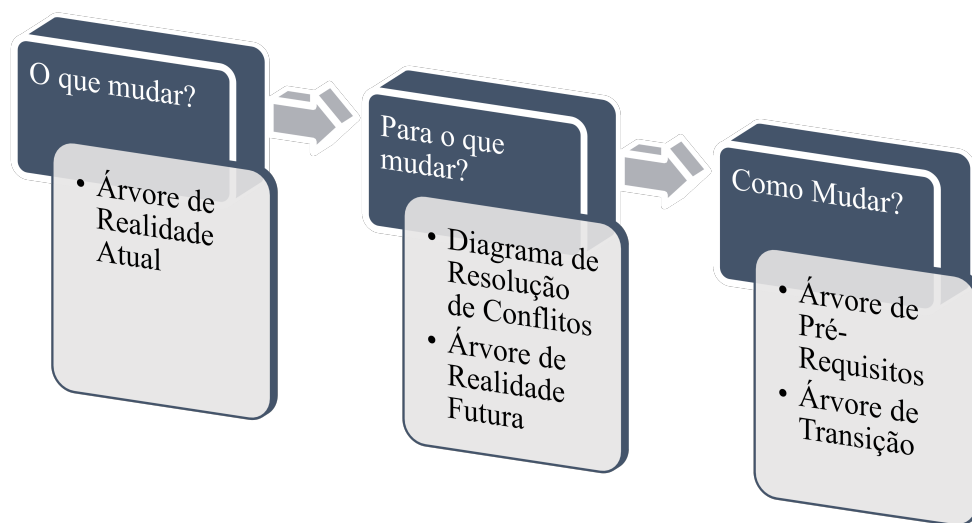


Figura 3.4 – Ferramentas Lógicas Integradas no Processo de Reflexão

#### Árvore de Realidade Atual (CRT)

Esta ferramenta pretende responder à pergunta “O que mudar?” e tem como objetivo identificar o Problema-Raiz do sistema, para tal, utiliza a proposição causa/efeito, ou “Se... então...”. A CRT mostra as ligações e os efeitos na operação em curso revelando as causas do problema.



De acordo com Moss (2007) o segredo é identificar os pressupostos que levam a crer na falta de possibilidade de uma solução visual. Assim, esta técnica é específica para identificar os pressupostos subjacentes do conflito aparente e para acabar com o impasse. Assim, para que se consiga visualizar melhor o diagrama, é apresentado na Figura 3.6 um modelo simplificado, onde inicialmente deve-se identificar o conflito que perpetua (infinita) um problema maior. Isto significa que é necessário, saber qual é o paradigma a ser quebrado pela solução no conflito. Desta forma, o objetivo A é o inverso do problema raiz identificado na CRT. A “Injeção” que aparece na figura representa a proposta de resolução para o conflito existente.

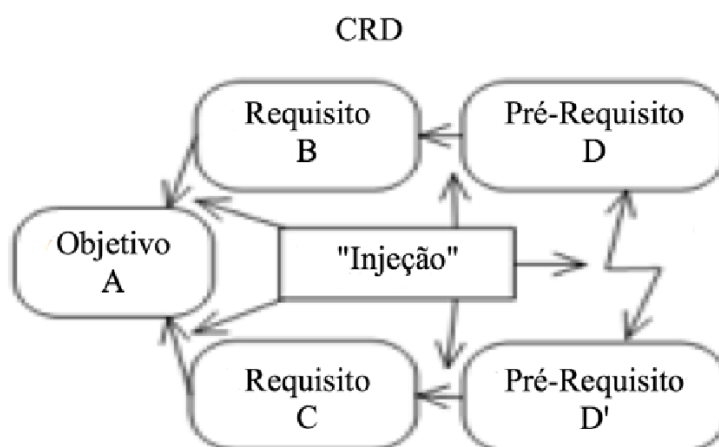


Figura 3.6 – Diagrama da CRD. Adaptado de: Watson et al (2007)

### Árvore de Realidade Futura (FRT)

Na Árvore da Realidade Futura (FRT), uma vez que foram identificados os pressupostos subjacentes do conflito, segundo Moss (2007) testa-se as possíveis soluções de relações de causa/efeito da CRT para eventos no futuro. Após a identificação de uma “Injeção” (proposta de solução), a FRT é usada para verificar se a aplicação bem-sucedida dessa injeção irá eliminar os sintomas. Ela também pode ser usada para identificar possíveis consequências negativas. Havendo consequências negativas, a solução deve ser alterada ou até mesmo fazer uma nova CRD.

Conforme a Figura 3.7 e em sentido contrário ao da CRT, de baixo para cima, a partir da injeção resolve-se o problema raiz, esperando que no fim, os efeitos indesejáveis da CRT se tornem efeitos desejáveis (ED).

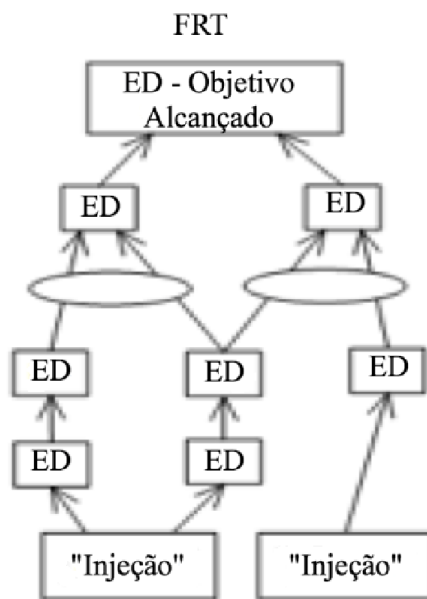


Figura 3.7 – Diagrama da FRT. Adaptado de: Watson et al (2007)

### Árvore de Pré-requisitos (PRT) e Árvore de Transição (TT)

Conforme Moss (2007) a Árvore de Transição (TT) e a Árvore de Pré-Requisito (PRT) são usadas para identificar as condições necessárias para causar a alteração e implementar a aplicação da ferramenta do Processo de Raciocínio. Estas ferramentas visam responder à pergunta “Como mudar?” e são utilizadas para identificar e superar os obstáculos para a realização de um objetivo ou implementação de uma solução. A PRT serve de ponte entre a FRT e a TT. Como tal, a PRT apresenta uma sequência temporal.

Assim, de acordo com Cogan (2007), considerando que nessa fase, do processo de aplicação da TOC numa instituição, as pessoas já estão menos resistentes a alterações, elas podem ajudar no projeto. A ideia é envolver as pessoas que vão executar as alterações.

Todavia, segundo o mesmo autor antes de iniciar a construção da PRT é preciso examinar as injeções na FRT, observar as que são facilmente realizadas e pegar a pior, isto é, a mais difícil de ser realizada e, como consequência, criar a PRT. Em seguida, para dar início à PTR, uma das injeções é colocada no topo do diagrama, como a principal. Deve-se construir uma coluna ao lado esquerdo intitulada de Obstáculo (Obs), listando todas as razões pelas quais não é possível a execução da “Injeção” (essas razões são os obstáculos). Para cada obstáculo deve-se fazer uma lista numa coluna à direita com as condições para que eles sejam superados. Caso não se consiga a condição para a superação do obstáculo,

considera-se o oposto do respectivo obstáculo, esses são chamados de Objetivos Intermediários (OIs).

Para uma melhor compreensão, é apresentado na Figura 3.8 um modelo de PRT onde para cada Obs previsto há um OI a ser alcançado e, as conexões lógicas entre eles atendem às relações de causa e efeito das diversas entidades.

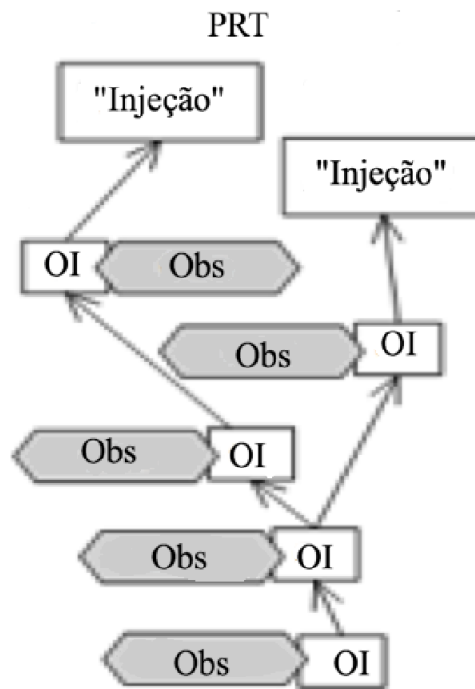


Figura 3.8 – Diagrama da PRT. Adaptado de: Watson et al (2007)

A TT conforme modelo é apresentado na Figura 3.9, é um processo aditivo, combinando cada efeito sucessivo, esperado, com subseqüentes ações específicas que implementam a FRT. Assim, para cada obstáculo previsto, há um objetivo intermediário a ser alcançado e, dependendo do número de OIs e de obstáculos, as árvores podem se tornar muito amplas, por isso, se torna necessário utilizar, somente, os principais OIs.

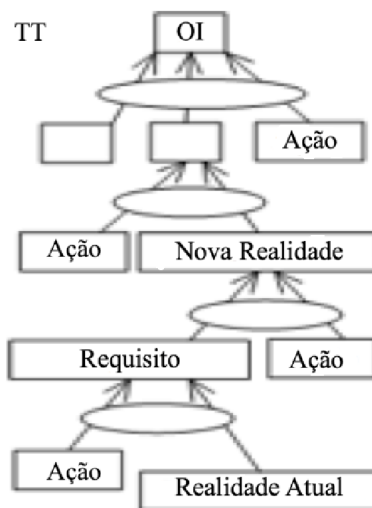


Figura 3.9 – Diagrama da TT. Adaptado de: Watson et al (2007)

### **Categorias de Reserva legítimas (CLR)**

As categorias de reserva legítima (CLR) são um conjunto de oito regras ou "testes" de lógica que podem ser usados para validar uma árvore. Eles são motivos justificados para que as pessoas observem reservas sobre uma árvore. Para ser logicamente sólida, uma árvore deve passar todos os oito testes.

Segundo Dettmer (2007) as oito categorias são:

- 1 **Clareza** – é usado para verificar a compreensão completa de uma palavra, ideia ou conexão causal e evitar formulações ambíguas. Todas as árvores e diagramas também são um bom suporte de comunicação, portanto, é importante garantir que o conteúdo seja totalmente compreendido por qualquer pessoa, mesmo pessoas não envolvidas na construção de árvores e diagramas;
- 2 **Existência da entidade** – verifica a realidade ou existência da entidade declarada na realidade do escopo da análise ou resolução de problemas. Às vezes, as pessoas confundem a construção de estruturas lógicas de Processos de reflexão e brainstorming, adicionando entidades que são suposições, mas não comprovaram as realidades;
- 3 **Existência da causalidade** – é a próxima coisa a verificar. A causa realmente leva a esse efeito? Em seguida, é importante ler em voz alta o relacionamento, por exemplo: "se existe A, então existe" ou "para ter B, devemos ter A";

- 4 **Causa suficiência** – procura por um (conjunto de) causa (s) ser suficiente por si só para criar o efeito. Em sistemas complexos, várias causas independentes podem levar ao efeito (OR lógico) ou algumas causas podem se combinar para produzir um determinado efeito (AND lógico);
- 5 **Causa adicional** – é o cheque se nenhuma outra causa, não mencionada até agora, poderia ter o mesmo efeito;
- 6 **Reversão de causa-efeito** – verifica a possível confusão entre causa e efeito;
- 7 **Existência de efeito previsto** – A existência é a busca por um efeito adicional esperável e verificável de uma determinada causa. Dettmer afirma que esta reserva não é autônoma, mas ajuda a validar ou invalidar a existência de causalidade. Se outro efeito previsível aparecer com essa causa, a causa existe. o efeito adicional não mostra, a existência da causa é muito provável inválida.
- 8 **Tautologia** - também chamado de lógica circular, está verificando se o efeito não é a única e insuficiente prova ou racionalidade oferecida para a existência da causa. Acontece principalmente quando a causa é intangível.

Mabin (2001) afirma que o uso mais importante para os CLRs é comunicar-se com os outros de forma não ameaçadora, o que promove a compreensão. A linguagem usada no TOC contém termos especiais como atalhos para aqueles que conhecem os termos, mas estes podem ser traduzidos para "todos os dias".

### 3.3.2. *Drum-Buffer-Rope*

Uma das ferramentas da TOC aplicadas na gestão de operações é o *Drum-Buffer-Rope* (Tambor-Buffer-Corda) cujo objetivo é sincronizar a manutenção através do balanceamento do fluxo do conjunto e não da capacidade individual de cada processo.

O modelo padrão do DBR, cria ordens de trabalho no processo de produção, de modo que sincronize com a taxa de produção do recurso menos capaz no processo. Este recurso é referido como o recurso de restrição de capacidade (CCR – *Capacity-Constrained-Resource*). Se o CCR funciona a uma taxa inferior à taxa de saída exigida pelo cliente, então é o estrangulamento, caso contrário, será o mercado o estrangulamento.

Para que se consiga entender melhor o conceito do *Drum-Buffer-Rope*, pode-se utilizar a analogia do processo de manutenção de um equipamento. A manutenção num

equipamento, requer uma lista detalhada com todos os processos a serem executados, estes processos têm tempos de execução diferentes. O gestor deverá ter em atenção estes tempos, mas terá também de ter conta, a mão-de-obra. Se deixar-se que sejam os funcionários a executar os processos à sua maneira, poderá ter-se a situação, em um funcionário mais experiente executa um processo de duração mais curto e outro funcionário com menos experiência executa processos mais demorados. Esta situação pode provocar atrasos no planeamento da manutenção.

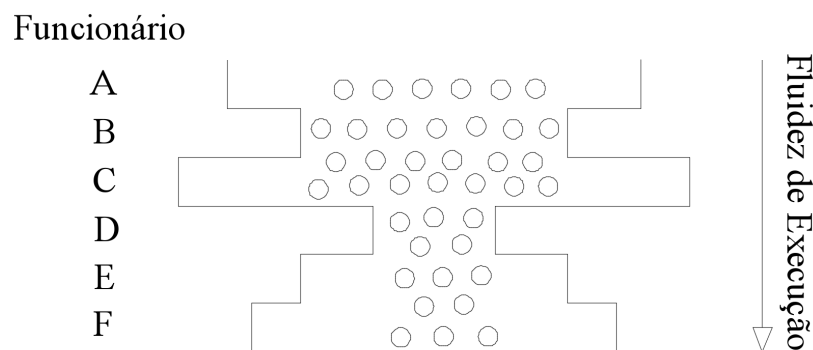


Figura 3.10 – Nível de experiência por funcionário.

Como pode ser verificado na Figura 3.10, consegue-se observar que existe um funcionário com menos experiência que provoca um atraso maior. É aqui que entra o DBR, com esta técnica, permite ao gestor identificar o funcionário menos experiente e associa-lo então aos processos menos demorados. Nesta analogia, pode-se considerar o termo “*Drum*” (Tambor) como sendo o funcionário D, o termo “*Buffer*” diz respeito ao tempo de atraso previsto para execução e, por fim, o termo “*Rope*” (Corda) diz respeito à limitação que o funcionário mais experiente fica sujeito, forçada pelo funcionário menos experiente.

Se por algum motivo o funcionário mais experiente necessitar de parar, essa paragem não deverá afetar o funcionário menos experiente, garantindo assim o cumprimento do tempo programado para a manutenção. Depois da paragem, o funcionário em causa retornará ao trabalho e, ao seu ritmo, recuperará o tempo perdido, isto só acontecerá se o comprimento da corda assim o permitir. O tamanho da corda deverá ser estudado de maneira a que, para todas as paragens que possam existir, o funcionário menos experiente não tenha de parar.

**Tambor (*Drum*):** é a principal restrição do sistema ou o CCR (*Capacity-Constraint Resource*). Este recurso processa as ordens de manutenção numa sequência específica,

baseada no prazo do planeamento da manutenção e na sua capacidade finita (TOCICO, 2012).

O CCR é definido como qualquer recurso cuja capacidade, se não for bem gerida, irá provavelmente comprometer o  $T$  da organização (TOCICO, 2012). De referir que este recurso não é a restrição principal do sistema, pois tem capacidade superior à procura. Contudo, quando a restrição está no mercado, é o recurso com menor capacidade e sobre o qual é baseado o planeamento. Assim, CCR é um recurso com potencial para se tornar uma restrição embora não o seja atualmente, porque nem sempre tem capacidade extra suficiente para “sprintar” e completar as ordens a tempo. Sempre que a restrição principal é explorada e o sistema ganha capacidade, os CCR também precisam de capacidade adicional ou tornam-se na nova restrição (Ricketts, 2008).

**Buffer:** de modo a proteger o output do sistema das flutuações estatísticas e variações imprevistas nos processos, é mantida uma quantidade suficiente de WIP, medida em unidades temporais, entre dois pontos específicos do sistema. Este elemento é assim composto por duas dimensões: tempo e espaço (Sproull, 2009). Segundo Cox e Schleier (2010) uma linha de produção com um recurso restritivo deve conter dois buffers, o buffer da restrição e o buffer de expedição. O primeiro é medido desde o ponto de libertação de material para o sistema até à restrição e protege a mesma de interrupções nos processos a montante. Goldratt (1990) define o buffer como o intervalo de tempo em que se antecede a libertação de material, relativamente à data planeada em que a restrição consome esse material. O *buffer* de expedição é medido desde a restrição até ao local de expedição do produto acabado, protegendo a data de entrega do produto ao cliente.

Para Cox e Schleier (2010) os *buffers* representam o lead time adicional permitido, para além do tempo de processamento e de *setup*, que os materiais têm para “viajarem” entre dois pontos específicos do sistema. Num mundo livre de perturbações, tais como avarias em equipamentos, o *Lead Time* da Produção – tempo de transformação da matéria-prima no produto acabado – pode ser simplesmente igual à soma dos tempos de processamento e dos tempos de *setup* de cada operação do sistema produtivo.

**Corda (Rope):** esta analogia refere-se à ligação entre a restrição principal e a libertação de material para o sistema, e funciona de modo a garantir que o material é lançado a tempo, impedindo paragens na restrição, e simultaneamente assegurando que o material

não é lançado a um ritmo mais rápido do que aquele a que a restrição o processa (TOCICO, 2012).

O DBR consiste num conjunto de regras para a implementação em fábrica dos primeiros três passos da TOC. A sua mais óbvia aplicação surge quando o desempenho de uma fábrica está limitada na capacidade de produção por um dos seus recursos, e todo o  $T$  da fábrica deve ser baseado na exploração e subordinação do sistema à restrição (Wu, Chen, Tsai, & Yang, 2010). Segundo Watson et al. (2007), esta ferramenta destina-se a abordar as restrições físicas e de mercado.

O modelo padrão do DBR, requer um software especializado para que seja implementado. Para as empresas que já possuem sistemas comuns de MRP (*Material Requirement Planning*), poderá ser utilizada, uma técnica alternativa conhecida como o modelo simplificado *Drum-Buffer-Rope* (S-DBR – *Simplified Drum-Buffer-Rope*), quando a empresa não é restrita por qualquer recurso interno.

#### **S-DBR – *Simplified Drum-Buffer-Rope***

O tambor em S-DBR é baseado em pedidos firmes. À medida que as ordens chegam, é feita uma verificação rápida na carga total do CCR. Se o CCR não estiver muito carregado, a ordem será aceite e enviada para a fábrica para execução. O único buffer mantido é o buffer de envio. A corda não está mais ligada à programação do CCR. Em vez disso, o cronograma de lançamento de material é gerado diretamente por pedidos firmes recebidos.

O modelo S-DBR tem algumas vantagens. Não requer nenhum software especializado, e isso pode ser um benefício significativo para as empresas, que podem não estar dispostas, ou ser incapazes, de investir em software DBR especializado (Schrageheim & Dettmer, 2000). Outra vantagem da abordagem S-DBR é que ele não precisa exigir dois buffers, mas precisa apenas de um. Finalmente, a abordagem S-DBR está mais focada na procura do mercado e vincula a organização com os seus clientes de forma mais direta.

### 3.3.3. CC

Segundo Izmailov et al. (2016) a metodologia da Teoria das Restrições para a mecanismos de gestão, *Critical Chain* (CC), identifica três fatores, que inevitavelmente criam efeitos negativos, que são os seguintes:

- Multitarefa;
- Síndrome do Estudante;
- Lei de Parkinson.

#### **Multitarefa**

O processo de parar o trabalho antes que seja concluído, a fim de fazer outro trabalho que é percebido como mais urgente ou importante (Peng & Huang, 2013). Cada vez que a execução da tarefa é interrompida, há perda imediata de eficiência devido à necessidade de lembrar detalhes para retomar a execução da tarefa mais tarde. Tarefas mentais difíceis podem exigir um tempo considerável para retornar. Pior ainda, a execução de uma tarefa individual também atrasa a execução das restantes tarefas. Como resultado, a duração total da manutenção aumenta (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016).

#### **Síndrome do Estudante**

Enquanto isso faz sentido, e isso é feito com as melhores intenções, o efeito sobre a manutenção é devastador. Logo que a margem de segurança se incorpore na avaliação do tempo em que surge a síndrome estudantil (Cox & Schleier, 2010). Primeiro, os alunos solicitam mais tempo para se prepararem para o teste, e quando o conseguirem, parece que há muito tempo e urgência removidos, eles não estão sendo preparados para o teste até o próximo prazo se aproximar (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016).

Passa-se o mesmo na manutenção. Quando as pessoas estão ocupadas, e estimam que a quantidade de tempo para executar a tarefa é suficiente, eles não irão ter uma razão real para começar. Como resultado, a maior parte do tempo seguro incluído em cada tarefa é desperdiçado no início da sua execução. A síndrome estudantil contribui significativamente para o aumento dos atrasos na manutenção (Cox & Schleier, 2010). Muitas vezes a seguinte situação aparece: tempo seguro que foi consumido pelos "alunos" no início, torna-se necessário no final para superar alguns obstáculos inesperados, mas já não existe. Como resultado, a tarefa é adiada, mesmo pensando que era tempo suficiente

e com margem de segurança para terminá-lo no cronograma (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016).

### **Lei de Parkinson**

Por outro lado, cada tarefa é afetada pela Lei de Parkinson (Parkinson, 1957). Esta lei garante que, se o tempo de segurança foi adicionado e não foi esgotado, a tarefa não seria concluída antes da hora programada, mesmo que não haja quaisquer obstáculos. Na verdade, há duas armadilhas (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016):

- Em primeiro lugar, quando as pessoas têm mais tempo para completar a tarefa, muitas vezes usam esse tempo para "melhorar". Assim, o trabalho se expande para preencher todo o tempo disponível;
- Em segundo lugar, para terminar o trabalho cedo - um desincentivo para as pessoas. Terminando a tarefa muito antes do prazo indica a administração que a avaliação do momento era demasiado "gordo", e que na verdade ele pode ser feito muito mais rápido. O próximo limite de tempo de uma tarefa será reduzido para reduzir a duração total do projeto. Levando isso em conta, os trabalhadores nunca iriam terminar as suas tarefas mais cedo do que o esperado para manter o seu tempo seguro inalterado.

Como resultado, a maioria das empresas já se terá apercebido, que a duração da maioria das tarefas é geralmente muito perto do tempo estimado e o número de tarefas concluídas ocorre mais tarde do que o tempo projetado (Cox & Schleier, 2010). A partir disso, é fácil concluir que a empresa faz um excelente trabalho na avaliação correta da duração de cada tarefa, portanto, não haverá espaço para se conseguir proceder a sincronizações da tarefa com o intuito de a melhorar, mas isso está longe de ser real (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016). Existe uma variação em cada projeto, enquanto uma tarefa pode levar 10 dias, essa mesma tarefa poderá levar cerca de 15 dias numa próxima vez, tudo devido a possíveis obstáculos que possam aparecer. Logo, na realidade, tentar prever a duração de uma tarefa é como tentar prever a duração de uma viagem, dentro de uma grande cidade, no mesmo horário, em diferentes dias.

A metodologia da Teoria das Restrições, *Critical Chain*, permite superar as consequências dos três efeitos negativos acima mencionados. A fim de reduzir o efeito

da multitarefa, a empresa tem de reduzir o número de postos de trabalho disponíveis. A própria presença de muitas tarefas em cada área de trabalho cria muitas oportunidades para trabalhos de multitarefa e priorizar o trabalho incorretamente (Peng & Huang, 2013). Os gestores da manutenção motivados para concluir as suas tarefas a tempo, convencem a que lhes sejam dados mais recursos e a mudar as prioridades. Os clientes e a administração exercerão pressão para que sejam reorientados os recursos. Os trabalhadores também tendem a escolher entre uma variedade de tarefas com base nas suas preferências e que lhes dê maior motivação. Tudo isso garante que hajam poucas multitarefas (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016).

A Cadeia Crítica suscita a redução do número de tarefas ativas ao congelar uma grande parte das tarefas em projeto. Ao reduzir a multitarefa, as pessoas permanecem focadas e executam as tarefas muito mais rápido, permitindo que elas se movam rapidamente de uma tarefa para outra, diante de menos filas de trabalho. Congelar pelo menos 25% das tarefas geralmente é suficiente para acelerar o progresso de trabalho e, portanto, o tempo de conclusão das tarefas. Quando as tarefas inicialmente selecionadas chegam ao fim, as tarefas congeladas podem ser ativas e executadas mais rapidamente. Este mecanismo em si, geralmente, leva a um aumento significativo no número de tarefas concluídas no tempo, sem atrasos de tarefas (mesmo que as primeiras fossem congeladas inicialmente).

Izmailov et al (2016), consideram que a metodologia CC usa três passos-chave para superar os efeitos negativos já mencionados anteriormente:

**1º Passo** – *Coordenação do transportador das tarefas com a restrição;*

**2º Passo** – *Planeamento do tempo de implementação da tarefa;*

**3º Passo** – *Usar buffers para decisões de gestão.*

Cox & Schleier (2010), por sua vez, consideram que a implementação da CC deverá ser realizada a partir de sete passos:

**1º Passo** – *Alcançar o buy-in<sup>4</sup> da organização (“Achieve management buy-in”);*

---

<sup>4</sup> Processo *buy-in* - Também conhecido como o processo para superar as cinco camadas de resistência.

**2º Passo** – *Reduzir o WIP e implementar o “full kitting”<sup>5</sup> (“Reduce WIP and implement “full kitting””);*

**3º Passo** – *Construir planos de projetos com buffer (“Build buffered project plans”);*

**4º Passo** – *Estabelece a gestão das tarefas (“Establish task management”);*

**5º Passo** – *Implementar processos circundantes (“Implement surrounding processes”);*

**6º Passo** – *Identificar oportunidades de melhoria contínua (POOGI<sup>6</sup>) (“Identify opportunities for continuous improvement”);*

**7º Passo** - *(Quando aplicável) usam entrega superior como vantagem competitiva para ganhar mais negócios (“Use superior delivery as a competitive advantage to win more business”);*

Já Peng & Huang (2013), consideram que o processo, para gerar a CC, é feito a partir dos seguintes passos:

**1º Passo** – *Determine a estimativa de duração de 50% de cada tarefa;*

**2º Passo** – *Empurre todas as tarefas o mais tarde possível, sujeitas a relações de precedência;*

**3º Passo** – *Elimine as contenções de recursos reorganizando as tarefas para gerar uma agenda viável como cronograma inicial;*

**4º Passo** – *Identifique a cadeia crítica como a cadeia mais longa na programação inicial que foi identificada no 3º Passo;*

**5º Passo** – *Adicione o buffer do projeto ao final da cadeia crítica;*

**6º Passo** – *Adicione os buffers de alimentação sempre que uma tarefa não crítica alimenta a cadeia crítica e desloca as tarefas na cadeia de alimentação pelo tamanho do buffer.*

---

<sup>5</sup> “full kitting” - A abordagem exige ter todas as peças no local antes de mover um pacote de trabalho do projeto para a frente. Este passo ajuda a reduzir significativamente o número de segundas ações para completar uma única etapa.

<sup>6</sup> POOGI - Processo de melhoria contínua.

Utilizando a lógica de Izmailov et al (2016), em que consideram que a metodologia CC usa três passos-chave para superar os efeitos negativos, pode-se definir esses passos da seguinte maneira:

**1º Passo – Coordenação do transportador das tarefas com a restrição**

Depois do processo inicial de congelamento, com o intuito de alcançar um estado de trabalho estável, é importante garantir que as novas tarefas sejam lançadas de modo sequencial e em quantidades reduzidas, de modo a que o número de tarefas ativas permaneça relativamente baixo, evitando assim, o problema de multitarefa (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016). A TOC demonstra que na linha de produção, em qualquer sistema ou projeto, o esforço desta é equivalente, ao esforço do elo mais fraco, restrição, na cadeia de operações (Cox & Schleier, 2010). Executar mais esforço do que a restrição pode aguentar, levará à acumulação de trabalho na frente da limitação, e não a um aumento no número de tarefas concluídas por unidade de tempo.

A CC requer, que sejam iniciados novos processos de trabalho, de acordo com a capacidade do elo mais fraco do sistema, e que sejam coordenados no tempo com ele (Cox & Schleier, 2010).

**2º Passo – Planeamento do tempo de implementação da tarefa**

O segundo passo importante da CC é planejar o tempo de segurança das tarefas, para que o tempo extra não fosse desperdiçado, e que a vida útil da tarefa fosse o mais curta possível, garantindo, simultaneamente, a fiabilidade do seu desempenho. Isto é conseguido pela definição da cadeia mais longa de tarefas e recursos dependentes para a manutenção no início de seu planeamento. O que é muito semelhante ao método do CP (*Critical Path*). No entanto, o CP para várias manutenções não permite levar em conta a situação em que o mesmo recurso é necessário para a execução simultânea de tarefas paralelas. Como resultado, o CP pode dar uma perspectiva mais otimista para o fim da manutenção em comparação com a CC, mas num cronograma realista (como se pode ver na Figura 3.11), aumentará e o plano corresponderá à CC (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016).

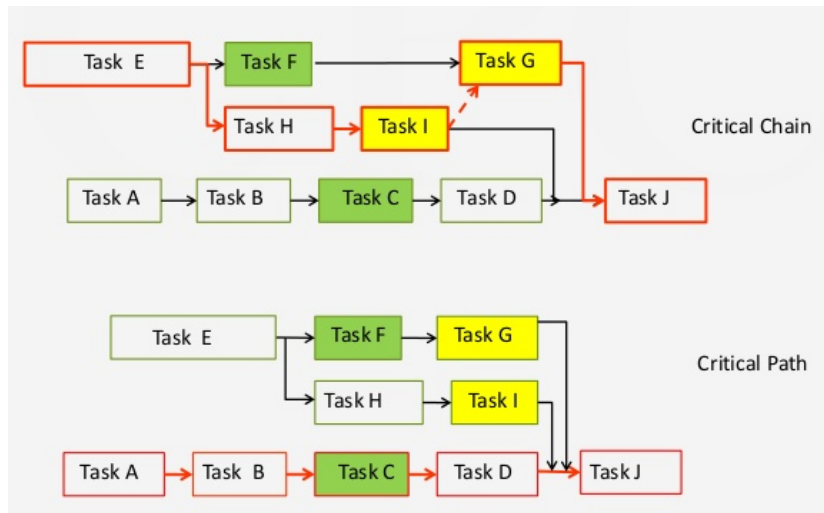


Figura 3.11 – Critical Path vs. Critical Chain

### 3º Passo – Usar buffers para decisões de gestão

O último elemento chave da metodologia da CC é sobre como os *buffers* são usados para tomar decisões de gestão da manutenção.

Se houver atrasos na CC, então parte do *buffer* de segurança será consumido no final da manutenção. Observando a percentagem de trabalho realizado na CC e a percentagem de tempo gasto pelo *buffer*, os gestores da manutenção podem ver os possíveis riscos para as manutenções futuras. Quando o tempo de *buffer* da manutenção é consumido mais rapidamente do que o trabalho é realizado na CC, então o *buffer* está na zona vermelha, noutras palavras, a manutenção corre o risco de sofrer atrasos (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016). Quando os dois, *buffer* e *Critical Chain*, movendo-se à mesma velocidade, o *buffer* fica na zona amarela, o que é bom. Quando o trabalho é feito a um ritmo mais rápido do que o consumo do *buffer* – a manutenção vai em frente e o *buffer* encontra-se então na zona verde. De realçar que, o gestor da manutenção pode-se aperceber de quantas manutenções estão a correr bem, quantos estão em perigo de sofrer atraso, e pode também, decidir quais as manutenções onde terá que intervir e como fazê-lo.

Finalmente, o método da CC fornece um modelo para o funcionamento dos próprios recursos, as pessoas que realizam as manutenções. Visibilidade de cada estado do *buffer* para cada tarefa, permite que as pessoas vejam claramente quais são as tarefas mais importantes no momento, permitindo-lhes tomar decisões informadas sobre as

prioridades sem a "ajuda" dos gestores. Eles também podem ver que é importante procurar ajuda se houver um atraso. Tarefa vermelha deve exigir objetivos claros para a assistência quando há um obstáculo, enquanto a tarefa verde pode esperar sem comprometer a manutenção (Izmailov, Korneva & Kozhemiakin, 2016).

#### **3.3.4. Buffer Management**

A Gestão de Buffer (*Buffer Management* – BM) tem como objetivo proteger o negócio e os seus clientes de potenciais manutenções por terminar. É uma condição necessária ao eficaz funcionamento do DBR, pois o BM monitoriza o progresso do planeamento executado pelo DBR (Cox & Schleier, 2010).

A gestão de buffer ajuda o gestor de manutenção a decidir a prioridade do trabalho de manutenção, isto é, se duas ou mais pessoas se aproximarem do gestor ao mesmo tempo, queixando-se de duas ou mais falhas diferentes. O gestor de manutenção geralmente decide sobre a prioridade de resposta com base na prioridade do equipamento. A gestão de buffer fornece uma base racional para tomar uma decisão em tais situações. Ele pode decidir sobre a prioridade com base na profundidade de impacto na produção criados por essas avarias, a estação de trabalho causando maior impacto deve ser atendida primeiro.

Na TOC o objetivo não é a melhoria de desempenho de todos os processos, mas apenas da restrição e dos recursos não restritivos que causam falhas nos *buffers*. Se o processo for melhorado, as falhas nos buffers irão desaparecer permitindo que numa atividade de melhoria contínua a sua dimensão seja diminuída constantemente, diminuindo em simultâneo o tempo de processamento e o inventário em processo.

O objetivo da gestão dos *buffers* é resumidamente:

- Planear a proteção necessária da restrição;
- Recomendar ações para aumentar ou diminuir a dimensão dos *buffers*;
- Recomendar ações de melhoria a médio prazo;
- Identificar a existência de outros processos com perda de capacidade protetora.

Para calcular o consumo de buffer, o PM (*Project Manager*) deve ter informações atuais sobre cada tarefa que foi iniciada e não foi concluída. Em cada ponto de verificação (diariamente ou uma ou duas vezes por semana), cada membro da equipa de manutenção

que está a realizar uma tarefa deve informar sobre o tempo restante para concluir a tarefa (Cox & Schleier, 2010).

Num conjunto de 100 ordens de execução, Cox and Schleier (2010) estimam que pelo menos 10% do conjunto sofre mais do que as normais variações dos processos, que são absorvidas pelos *buffers*. Se não forem tomadas ações corretivas, esses 10% de ordens chegam à restrição depois do prazo estabelecido. De forma a tomar as necessárias ações corretivas antes de o WIP chegar ao seu destino, é calculado o *Buffer Status* (Estado das Reservas) que fornece informação em tempo real de como está a decorrer o processamento de cada ordem de execução, independente da sua localização na fábrica:

$$Buffer\ Status\ (\%) = \frac{Tempo\ de\ Execução\ Disponível}{Duração\ do\ Buffer} * 100 \quad (11)$$

Os *buffers*, o *constraint buffer* (CB) e o *shipping buffer* (SB) são divididos em três períodos de tempo iguais. Por exemplo, se o SB era de 12 dias, então cada uma das três zonas seria de quatro dias de duração. Se a ordem era nove dias de distância da data exigida no cronograma de embarque então seria na primeira zona que é de cor verde, com um *buffer status* entre 67% e 100%. Se a ordem era cinco dias longe da data exigida no transporte agendado então a ordem estaria na segunda zona, zona amarela que corresponde a um *buffer status* 33% e os 66%. Se a ordem era dois dias longe da data exigida na programação do transporte então a ordem seria vermelha (*buffer status* inferior a 33% = falha no *buffer*) (TOCICO, 2012). Em caso de a ordem calhar na zona vermelha, esta deve ser localizada e será acionado um plano de ação para que a penetração na zona vermelha do *buffer* não afete o *T* da organização, como anteriormente referido (Cox & Schleier, 2010).

#### **Zona Verde – Variação Esperada**

O tempo foi agregado nos *buffers* de CC para proteger a data de conclusão da manutenção. Se tudo funcionar de acordo com a programação CC, alguns ou todos os buffers serão usados e a manutenção será concluída na data programada ou antes desta. À medida que a manutenção prossegue, podemos esperar que um terço dos *buffers* sejam utilizados devido à incerteza inerente à tarefa (Cox & Schleier, 2010).

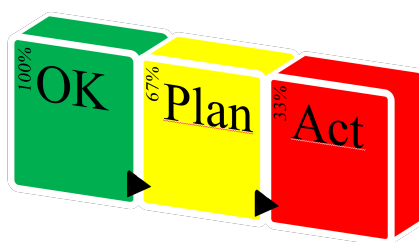
### **Zona Amarela – Variação Normal**

A base para a discussão de Deming (Deming, 1986) de adulteração foi a sua hipótese (agora universalmente aceite) que existem dois tipos de variação em qualquer processo. Ele os chamou de "causa comum" de variação e "causa especial" de variação (Cox & Schleier, 2010).

A variação da causa comum é inerente ao design do próprio processo, porque nenhum processo é perfeito. Por sua própria natureza, os tempos das tarefas da manutenção são incertas. A utilização do segundo terço dos *buffers* CC é normalmente causada devido à incerteza inerente à previsão da duração da tarefa (Hu, X. et al, 2016). Pequenas variações na operação de uma manutenção não são uma razão para alarme, mas se o segundo terço do *buffer* começa a ser usado para cobrir excessos de tarefas, os planos devem ser formulados para recuperar o tempo perdido. No entanto, para evitar adulteração, a ação não deve ser iniciada até que a variação anormal, o último terço do *buffer*, seja experimentada (Cox & Schleier, 2010).

### **Zona Vermelha – Variação Anormal**

A causa especial (anormal) de variação é geralmente o resultado de um evento único fora do curso normal da operação da manutenção. Quando a parte vermelha do *buffer* é penetrada, é definitivamente tempo para a ação e a implementação dos planos feitos enquanto o consumo de *buffer* estava na parte média do *buffer* (Cox & Schleier, 2010).



*Figura 3.12 – Esquema de zonas de ação.*

Na Figura 3.12, pode ser verificado um esquema das zonas de ação do BM. Para além do controlo local, o BM fornece um nível de feedback global do DBR, adquirido através da frequência de falhas no buffer, que segundo Youngman (2009) são a medida de estabilidade do sistema. As tendências evidenciadas pelas penetrações na zona vermelha funcionam como alerta para mudanças na dinâmica do sistema.

### 3.3.5. Análise V-A-T-I

Youngman (2009) afirma que existem 4 topologias básicas que descrevem o fluxo de material dentro de uma organização. Estas topologias são:

- Planta – V;
- Planta – A;
- Planta – T;
- Planta – I;

Na Figura 3.13, consegue-se ver como Youngman (2009), Cox & Schleier (2010) e TOCICO (2012) consideram esta análise:

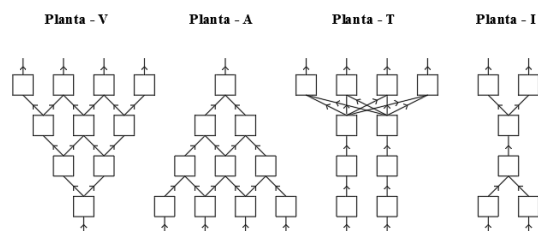


Figura 3.13 – Análise V-A-T-I (Adaptado: Youngman, 2009)

Na Tabela 3.1, é explicado como funciona cada topologia e possíveis aplicações:

Tabela 3.1 – Topologias da Análise V-A-T-I

	<b>Topologia</b>	<b>Descrição</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Referência</b>
<b>Planta - V</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Input e vários Outputs;</li> <li>- Natureza Divergente;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produtos de Metal.</li> </ul>	TOCICO, 2012 Youngman, 2009 Cox & Schleier, 2010
<b>Planta - A</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vários Inputs e apenas 1 Output;</li> <li>- Natureza Convergente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aviões;</li> <li>- Barcos;</li> <li>- Produtos Eletrónica.</li> </ul>	TOCICO, 2012 Youngman, 2009 Cox & Schleier, 2010
<b>Planta - T</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poucos Inputs e vários Outputs;</li> <li>- Ponto final de montagem divergente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção Automóvel;</li> <li>- Linhas de Pintura.</li> </ul>	TOCICO, 2012 Youngman, 2009 Cox & Schleier, 2010
<b>Planta - I</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesmo número de Inputs e Outputs</li> <li>- Sistema mais simples de funcionamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produtos de Madeira.</li> </ul>	TOCICO, 2012 Youngman, 2009 Cox & Schleier, 2010

### 3.3.6. Medidas de Desempenho

A avaliação do desempenho é uma medida operacional de sobrevivência de uma organização, e não apenas uma ferramenta de gestão, uma vez que, as organizações, necessitam de controlar as tarefas operacionais, controlar a programação das tarefas e identificar os problemas que necessitem de intervenção. As medidas de desempenho devem servir como uma ferramenta objetiva de medir a situação atual da organização em diversos aspectos (Cox & Schleier, 2010).

A TOC sustenta que apenas são necessárias três métricas diretas para as decisões operacionais do dia-a-dia. Essas três métricas ocuparam espaço em todos os livros de custo e gestão de contabilidade, sob nomes ligeiramente diferentes, desde pelo menos os anos 1960 (Cox & Schleier, 2010). Os nomes mais conhecidos dessas métricas são:

- **Throughput (T – Taxa de Transferências)** – Receita de vendas menos todos os custos variáveis (produção e geral, vendas e administração);
- **Inventory (I – Inventário) (ou Investment)** – Os fundos que uma organização gastou para estar em condições de produzir;
- **Operating Expenses (OE – Despesas Operacionais)** – As despesas repetitivas que uma empresa deve incorrer em cada período para manter a empresa a operar.

Diferentes definições de termos, sem dúvida, causaram muita confusão. Embora seja impossível, nesta data tardia, mudar a terminologia TOC, as pessoas treinadas em contabilidade chamam "*Throughput*" pelo nome "*Contribution Margin*", com a mesma definição – receita menos custos totalmente variáveis. "*Inventory*" é um subconjunto altamente controlável de "*Investment*" no total de ativos. As "*Operating Expenses*", na terminologia contábil, seriam "*Fixed Costs*", incluindo custos fixos de fabricação e custos fixos gerais, de venda e administrativos fixos (Cox & Schleier, 2010).

A TOC tem como objetivos básicos, aumentar o "*Throughput*", diminuir o "*Inventory*" e diminuir o "*Operating Expenses*". Os aumentos de "*Throughput*" e as reduções de despesas serão refletidas favoravelmente em relatórios externos que estejam de acordo com os GAAP<sup>7</sup>. As reduções de "*Inventory*", no entanto, serão refletidas

---

<sup>7</sup> GAAP (*Generally Accepted Accounting Principles*) - Exige que os custos reais (não constantes) tenham de aparecer no balanço, na demonstração do resultado e nos custos padrão, mais variações favoráveis ou variações menos desfavoráveis, custos reais iguais.

desfavoravelmente nas declarações GAAP, reduzindo os ativos e a receita operacional. Portanto, as reduções de “*Inventory*” devem ser tratadas com cuidados especiais (Cox & Schleier, 2010).

“*Throughput*”, “*Inventory*” e “*Operating Expenses*” são sempre relevantes. No entanto, é extremamente difícil selecionar com precisão os custos e receitas relevantes (incluindo aqueles associados a oportunidades perdidas) de muitas, senão a maioria, decisões de gestão.

### ***Throughput Accounting***

Se as decisões, estão sendo feitas usando métricas operacionais e estão focadas no aumento do “*Throughput*”, é possível também alinhar as métricas financeiras da organização. A TOC baseia-se neste conceito e reconhece que uma organização é um sistema e, portanto, independentemente de quão bem é feita a sua gestão, a sua capacidade de aumentar o “*Throughput*” será limitada pela restrição do sistema. Além disso, se identificarmos o que é a restrição e onde está, e, ao mesmo tempo, submeter os esforços de todos para maximizar a sua eficácia, consegue-se assim desbloquear o segredo para maximizar o “*Throughput*” da organização.

## **3.4. TOC, *Lean* e Seis Sigma**

Dettmer (2007) afirma que o *Toyota Production System* é mais conhecido do que a TOC, principalmente porque é um sistema muito mais antigo (desenvolvimento iniciado na década de 1950) enquanto que a TOC remota à década de 1980. Ambos os sistemas usam a melhoria contínua e têm como objetivo obter maiores lucros.

Cox & Schleier (2010), afirmam que os principais elementos da TOC, *Lean* e Six Sigma funcionam bem juntos. Pirasteh & Farah (2006), combinaram os "melhores componentes" dessas três abordagens no qual chamaram de TLS.

- ***Theory of Constraints (TOC):***
  - Concentra-se em melhorar as restrições do sistema que determinam o seu desempenho geral e, dessa forma, aumenta significativamente o retorno do investimento e o sucesso dos programas *Lean* & Six Sigma;

- Aumenta os lucros aumentando as vendas, em vez de reduzir custos e, portanto, evitar reduções de pessoal;
- Desenvolvido por *Eliyahu Goldratt* na década de 1980.
- ***Lean Manufacturing / Toyota Way:***
  - De longe, a abordagem mais utilizada na indústria em todo o mundo;
  - Um foco na eliminação de todas as formas de desperdício;
  - Uma abordagem multidimensional: gestão, *Just-In-Time*, *5S*, *Lean Engineering*, ...
  - Desenvolvido pela *Toyota Motor Company* na década de 1950, passou a ser chamado "*Lean*" desde 1990.
- ***Seis Sigma (Six Sigma):***
  - Reduz a variabilidade do processo para 3,4 defeitos por milhão de ocorrências;
  - Principalmente implementado usando especialistas certificados;
  - Inclui uma ferramenta poderosa para ser usada em problemas importantes e complexos (*Design Of Experiments / DOE*);
  - Promovido pela *Motorola & General Electric* na década de 1980.
- ***TLS = TOC + Lean + Seis Sigma:***
  - Desenvolvido em 2006 por *Pirasteh & Farah*.

Os esforços de melhoria industrial nos últimos 20 anos foram afetados por brigas, quanto aos méritos relativos das diferentes abordagens e das supostas incompatibilidades ou diferenças fundamentais entre elas. A TLS considera, pelo contrário, que devemos procurar combiná-los, criando um sistema que contenha os melhores aspectos de cada movimento.

### 3.4.1. Combinação das técnicas

Ao concentrar as atividades de *Lean* e *Seis Sigma* nas restrições, que afetam diretamente o desempenho global, o retorno sobre o investimento para esses esforços é necessariamente maior. Este método (TLS), evita o desânimo que surge quando as restrições não são limitadas, sem um impacto significativo no desempenho global. TLS fornece resultados que não são apenas significativos, visíveis nos resultados da linha de fundo, mas também são muito rapidamente alcançados.

As "técnicas de pensamento lógico" da TOC ajudam a:

- Tornar a solução lógica clara;
- Esclarece situações nas quais a restrição não é um estrangulamento físico, mas sim uma restrição de política, que pode ser eliminada alterando as regras ou comportamentos.

A TOC foi injetada no sistema Lean:

- O "fluxo de uma peça" foi desafiado e um buffer de uma dúzia de peças foi implementado em frente ao estrangulamento para proteger este recurso de pequenas interrupções (3 minutos ou menos) nos processos a montante;
- A atenção da gestão foi focada no recurso de estrangulamento (sem paralisações para intervalos de almoço, 5 porquês rápidos sobre problemas de produção recorrentes, prioridade para manutenção, ...).

Com a combinação, as três medidas de desempenho (Receitas, Despesas Operacionais e Investimentos) caminham no sentido desejado a uma taxa superior em relação à tentativa de aplicação de uma só metodologia. O Lean e Seis Sigma trazem o rigor e disciplina à TOC, o que se traduz na redução de desperdícios e variações enquanto o foco está no  $T$  (Sproull, 2009).

Segundo a Goldratt Institute (2009), este processo de combinação de técnicas, ao qual foi dado o nome de TOCLSS, inicia-se (primeiro passo) com o desenvolvimento de um mapa estratégico, que direcione as ações da organização para a área correta, de forma a aumentar os seus resultados. De seguida (segundo passo), são reconfiguradas as políticas, medidas de desempenho e regras da organização segundo os princípios da TOC, e são concebidas as operações que tornem o sistema estável e previsível, focando-se as mesmas na gestão e proteção da restrição.

No terceiro passo são implementadas as ações anteriormente planeadas, com o intuito de obter um sistema com resultados espectáveis, para posteriormente serem introduzidas as ferramentas do Lean e Seis Sigma, através da aplicação de contínuas ações de melhoria de modo a aumentar o  $T$  e diminuir o  $I$  e  $OE$ . Por último (quarto passo), são institucionalizados os processos e melhorias provocadas, sustentando os ganhos. Também são documentados os detalhes da estratégia e implementação antes do ciclo recomeçar (Goldratt Institute, 2009).

A TLS utiliza assim a sinergia entre o Lean, 6S e TOC para fornecer uma metodologia de melhoria contínua focada no sistema.

A aplicação da TLS mais conhecida foi realizada na *Sanmina-SCI*, organização que inicialmente usava o Lean e 6S para encontrar e eliminar as causas dos seus problemas. Esta empresa, realizou uma experiência em 21 fábricas ao longo de dois anos e meio, onde se realizaram mais de 100 projetos diferentes. Dessas fábricas, 11 utilizaram o modelo Seis Sigma, 4 o modelo Lean e 6 o modelo híbrido TLS. Quando comparadas em termos de contribuição para a redução de custos, Figura 3.14, as 6 fábricas que implementaram TLS, contribuíram em 89% no total da redução de custos, enquanto as fábricas que implementaram Seis Sigma contribuíram com 7% e as que implementarem Lean com 4% (Woepfel, 2009).

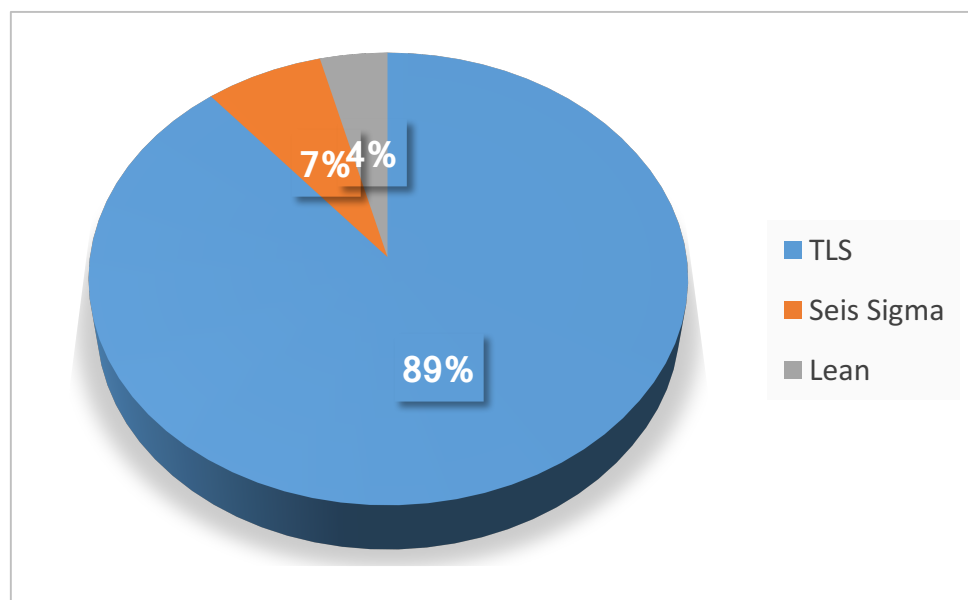


Figura 3.14 – Contribuição para a redução de custos de cada modelo. Adaptado de: Woepfel (2009)

Este estudo indicia vantagens para uma empresa na utilização de um modelo híbrido que une TOC, Lean e Seis Sigma.



## **4. Modelo de implementação da TOC na Gestão da Manutenção.**

Tendo adquirido os conhecimentos relativos à Teoria das Restrições e à Gestão da Manutenção, pretende-se realizar uma interligação entre estas duas áreas, com o intuito de criar uma ferramenta, que permita encontrar/solucionar problemas relacionados com a Gestão da Manutenção e que apresente resultados práticos da sua aplicação.

Este modelo, visa dar resposta a problemas no contexto da gestão da manutenção, para tal, foi construído de maneira a dar resposta a cada caso específico que possa aparecer numa organização.

### **Modelo IPR**

O modelo IPR (Identificar, Planear e Resolver) consiste numa sequência de três etapas, que devem ser adotadas de maneira a identificar e resolver problemas, restrição do sistema, na gestão da manutenção. Estas três etapas são:

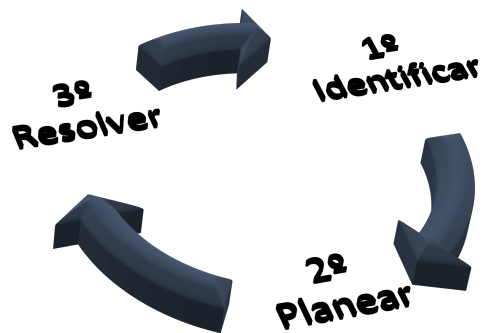
**1ª Etapa** – Identificar o(s) problema(s);

**2ª Etapa** – Planear a resolução;

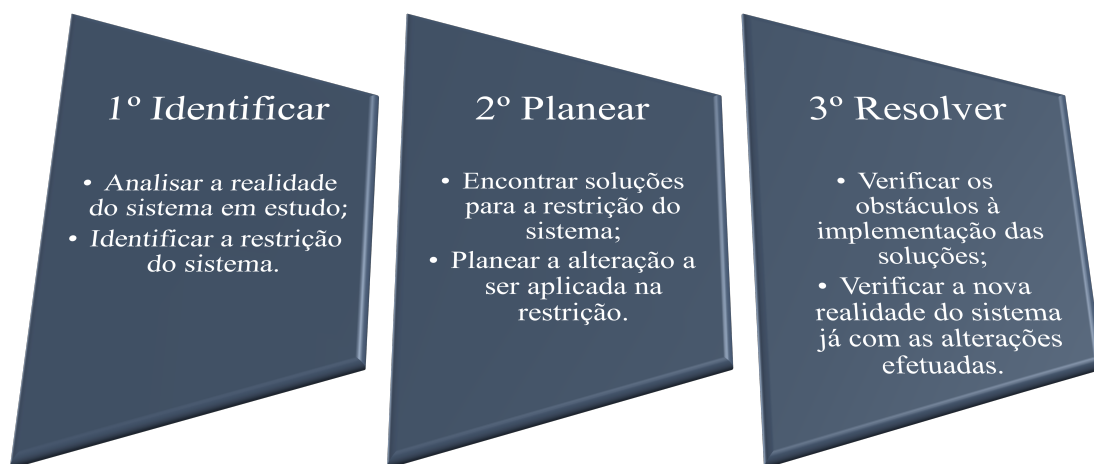
**3ª Etapa** – Resolver o(s) problema(s).

Como pode ser observado na Figura 4.1, este modelo é baseado nos 5 passos da melhoria contínua da TOC e no ciclo PDCA, uma vez que, o objetivo da TOC é contornar/eliminar as restrições do sistema, este modelo foi estruturado para que seja um ciclo, onde começa-se por identificar a restrição do sistema, a seguir, encontra-se soluções para tentar eliminar a restrição e na última etapa resolve-se a restrição.

Sempre que se resolve uma restrição, outra restrição pode aparecer, tendo em conta esse aspeto, o ciclo do modelo IPR, está desenvolvido com o propósito de voltar sempre ao início, tornando-o assim, num modelo de melhoria contínua. Na Figura 4.2 são indicados os objetivos referentes a cada etapa deste modelo.



*Figura 4.1 – Modelo IPR*



*Figura 4.2 – Objetivo de cada etapa do modelo*

Para que se consiga entender melhor o funcionamento deste modelo, faz-se uma comparação com os 5 passos da melhoria contínua da TOC. Segundo Goldratt & Cox (2004), os 5 passos do processo de melhoria contínua da TOC são:

- 1º Passo** – IDENTIFICAR a restrição(ões) do sistema;
- 2º Passo** – Decidir como EXPLORAR a restrição do sistema;
- 3º Passo** – SUBORDINAR o resto do sistema ao passo anterior;
- 4º Passo** – ELEVAR a principal restrição do sistema;

**5º Passo** – Se no passo anterior a restrição for quebrada, voltar ao 1º Passo.

Com base nestes 5 passos, foram criadas as 3 etapas do modelo IPR, fazendo a comparação, a 1ª etapa do modelo coincide com o 1º passo da melhoria contínua, a 2ª etapa do modelo, já engloba o 2º e 3º passos da melhoria contínua, enquanto que a 3ª etapa do modelo, engloba o 4º e 5º passos da melhoria contínua.

A ideia de criar este modelo, apenas com três etapas, passa por torna-lo num modelo simples e que seja de fácil aplicação, mas como já foi referido, cada organização tem uma realidade diferente que terá de ser analisada e, posteriormente, ser feita a aplicação do modelo consoante essa mesma realidade.

Tabela 4.1 – Ferramentas da 1ª Etapa do modelo IPR

Ferramentas		Prós	Contras
<b>Identificar</b>	Pensamento Lógico CRT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Serve de base para a compreensão de sistemas complexos;</li> <li>- Identifica efeitos indesejáveis de um sistema;</li> <li>- Identifica a alteração mais simples para o maior impacto positivo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muito detalhada e preparação demorada;</li> <li>- Difíceis de comunicar;</li> <li>- Imagem pouco apelativa.</li> </ul>
	<i>Drum-Buffer-Rope</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Previne a sobrecarga do sistema;</li> <li>- Mede a carga de trabalho no sistema como tempo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nenhuma consideração com deslocamentos dos estrangulamentos;</li> <li>- Apenas o “<i>Upstream Inventory</i>” interessa;</li> <li>- Flexibilidade limitada na gestão das operações em apenas um loop.</li> </ul>

As ferramentas apresentadas na Tabela 4.1, referem-se à 1ª etapa do modelo IPR, nesta tabela são explicados os prós e contras para cada ferramenta, com o intuito de ajudar, a quem implementar o modelo, a escolher qual a ferramenta mais indicada para a situação que estará a analisar.

As Tabelas 4.2 e 4.3, são referentes à 2ª e 3ª etapas do modelo, respectivamente, tal como na tabela da 1ª etapa, estas também contêm a informação de prós e contras referentes as ferramentas a si associadas.

Tabela 4.2 – Ferramentas da 2ª Etapa do modelo IPR

Ferramentas		Prós	Contras	
Planear	Pensamento Lógico	CRD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Confirma a existência de um conflito;</li> <li>- Explica porque existe o problema;</li> <li>- Resolve o conflito, a partir de “injeções”.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pode ficar informação importante de fora;</li> <li>- Diagrama não é suficientemente genérico.</li> </ul>
		FRT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite testar a eficácia de novas ideias, antes de comprometer recursos;</li> <li>- Avalia o impacto das decisões tomadas;</li> <li>- Serve como ferramenta de planeamento inicial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não impede um líder de alterar a sua visão;</li> <li>- Existe a necessidade de verificar quem, ou o que, poderá estar contra a alteração.</li> </ul>
	<i>Critical Chain</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentra-se nos recursos e não nas restrições de tempo;</li> <li>- Melhor em situações em que não tem horários rigorosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é muito fiável em situações que existam horários rigorosos;</li> <li>- Limitação na utilização dos Buffers;</li> <li>- Reprogramação.</li> </ul>
	<i>Buffer Management</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planeia a proteção necessária da restrição;</li> <li>- Recomenda ações para aumentar ou diminuir a dimensão do buffer;</li> <li>- Identifica a existência de outros processos com perda de capacidade protetora.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O gestor deverá ter informações atuais de cada tarefa iniciada e por concluir;</li> <li>- O tamanho inicial do buffer não é o correto.</li> </ul>

Tabela 4.3 – Ferramentas da 3ª Etapa do modelo IPR

Ferramentas		Prós	Contras	
Resolver	Pensamento Lógico	PRT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifica obstáculos que impedem alcançar o objetivo desejado;</li> <li>- Identifica a sequência de ações necessárias para o rumo desejado;</li> <li>- Identifica e descreve etapas desconhecidas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Podem tornar-se muito extensas devido a existência de muitos obstáculos;</li> </ul>
		TT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fornece um método passo-a-passo para implementar a ação;</li> <li>- Deteta desvios a um objetivo limitado;</li> <li>- Evita efeitos indesejáveis decorrentes da implementação;</li> <li>- Desenvolve planos de ação tática para planos estratégicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grandes alterações podem provocar falta de controlo no processo;</li> <li>- Os diagramas tendem a ser muito extensos consoante o número de objetivos intermédios que existam.</li> </ul>
	<i>Drum-Buffer-Rope</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Previne a sobrecarga do sistema;</li> <li>- Mede a carga de trabalho no sistema como tempo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nenhuma consideração com deslocamentos dos estrangulamentos;</li> <li>- Apenas o “<i>Upstream Inventory</i>” interessa;</li> <li>- Flexibilidade limitada na gestão das operações em apenas um loop.</li> </ul>	

### 1ª etapa – Identificar

Esta primeira etapa tem como objetivo:

- Analisar a realidade do sistema em estudo;
- Identificar a restrição do sistema.

Cada sistema tem uma realidade diferente, para que se consiga identificar a restrição presente no sistema, é necessário analisar a sua realidade. Só depois de conhecer a realidade do sistema, é que se consegue identificar a restrição.

As restrições presentes num sistema podem ser do tipo:

- Recursos;

- Material;
- Equipamentos;
- Instalações;
- Financeiras;
- Políticas.

Um sistema pode ter mais do que uma restrição, para começar é necessário identificar a restrição principal, ou seja, aquela que está a estrangular mais o sistema.

Nesta primeira etapa, pode ser utilizada uma das seguintes ferramentas:

- Ferramenta Lógica: CRT;
- *Drum-Buffer-Rope*.

A ferramenta lógica CRT permite que a partir de um problema geral se consiga identificar o problema-raiz que o está na sua origem, esta ferramenta utiliza a relação causa-efeito-causa, ou “Se ... então ...” e descreve o estado atual das coisas destinadas a identificar a restrição do sistema (Problema-Raiz). A CRT mostra as ligações e os efeitos na operação em curso revelando as causas do problema.

Por sua vez, a ferramenta *Drum-Buffer-Rope* é uma ferramenta mais robusta e consegue ser enquadrada em duas fases deste modelo (IPR). Esta ferramenta permite que se consiga identificar o problema (restrição), usando o *Drum* (Tambor) para identificar o processo, ou tarefa, que está a fazer com que os planos de manutenção não sejam executados dentro dos prazos estipulados pela organização.

## **2ª etapa – Planear**

A segunda etapa do modelo, tem como objetivo:

- Encontrar soluções para a restrição do sistema;
- Planear a alteração a ser aplicada na restrição;

Tendo sido identificada a restrição na primeira etapa, passa-se então para esta segunda etapa, esta etapa consiste em tentar encontrar soluções que visem resolver a restrição. Tendo estas soluções, segue-se então o planeamento da alteração a ser efetuada, este passo é muito importante, pois é aqui que é feita a ligação à etapa seguinte.

Nesta segunda etapa, pode ser utilizada uma destas ferramentas:

- Ferramentas Lógicas: CRD e FRT;
- *Critical Chain*;
- *Buffer Management*.

As ferramentas lógicas aplicadas nesta etapa, CRD e FRT, servem para planejar e verificar possíveis soluções que possam vir a resolver o problema-raiz identificado pelo CRT na primeira etapa. A CRD passa por identificar os requisitos e pré-requisitos do sistema de maneira a que se consiga chegar ao objetivo. Tendo os requisitos e pré-requisitos do sistema passa-se por escolher a “injeção” necessária para combater o Problema-Raiz. A FRT testa a solução (“Injeção”) para determinar se ocorrerá a alteração desejada de EIs para EDs, conseguindo assim alcançar um “objetivo desejado”.

O *Critical Chain* enquadra-se nesta etapa pois, uma vez identificado o problema, permite que se consiga delinear um trajeto, ou caminho, que permita contornar esse problema. Esta ferramenta, como foi mencionado no capítulo 3, tem por base identificar e tentar contornar três grandes problemas de gestão que são:

- Multitarefa;
- Síndrome do Estudante;
- Lei de Parkinson.

O *Buffer Management* permite controlar os *buffers* de maneira a proteger a organização de perdas financeira originadas por manutenções que estejam por terminar. Esta ferramenta é uma condição necessária ao eficaz funcionamento do DBR, pois o BM monitoriza o progresso do trabalho executado pelo DBR.

### **3ª etapa – Resolver**

Esta etapa vem completar o modelo, e têm como objetivo:

- Verificar os obstáculos à implementação das soluções;
- Verificar a nova realidade do sistema, já com as alterações efetuadas.

Tendo completado as etapas anteriores, fica a faltar resolver a restrição do sistema, para tal, é necessário verificar os possíveis obstáculos que possam aparecer enquanto se procede à implementação das soluções encontradas na segunda etapa. Com isso são

definidas ações para contrariar esses obstáculos, só depois se consegue passar para a nova realidade do sistema. Esta nova realidade tem por base as soluções e as ações, anteriormente definidas, e vem então resolver a restrição identificada na primeira etapa.

Nesta etapa, pode ser utilizada uma das seguintes ferramentas:

- Ferramentas Lógicas: PRT e TT;
- *Drum-Buffer-Rope*.

A PRT tem como principal objetivo visualizar possíveis obstáculos (Obs) a serem ultrapassados, e servir de “elo” entre a proposta da FRT com a TT. A TT é um processo aditivo, combinando cada efeito sucessivo, esperado, com subsequentes ações específicas que implementam a FRT.

O DBR, tal como mencionado na primeira etapa, é uma ferramenta robusta, que consegue ser enquadrada em duas etapas distintas deste modelo. Depois de ter sido identificado o problema, e com a ajuda do *Buffer Management*, consegue-se então resolver o problema usando a corda como meio de união, permitindo assim o progresso das tarefas de maneira a cumprir com os prazos.

Completadas as três etapas do modelo, pode-se identificar, caso o gestor o pretenda, uma nova restrição, e assim, continuar o processo iterativo de melhoria contínua, que aqui está a ser proposto neste modelo.

## 5. Caso de Estudo

Neste capítulo pretende-se fazer um estudo, de maneira a que se consiga demonstrar a utilização do modelo proposto (IPR). Foi realizado um trabalho em parceria com uma empresa do ramo metalúrgico com o intuito de comprovar a fiabilidade do modelo em causa.

### 5.1. Definição do Problema Proposto

Pretende-se neste capítulo, estudar a implementação do modelo IPR num contexto real, de maneira a conseguir-se analisar, se será um modelo adequado à resolução de problemas. Para tal, foi realizado um caso de estudo numa organização com o intuito de recolher dados que servissem para identificar um problema e a sua resolução.

A convite da organização, foi possível acompanhar a execução de manutenções preventivas em diversos equipamentos, conseguindo assim identificar os problemas de gestão que fossem aparecendo.

Neste período em que foi possível acompanhar os trabalhos de manutenção preventiva, conseguiu-se registar vários problemas relacionados com a gestão da manutenção, esses problemas são:

- Baixa produtividade da manutenção;
- Incumprimento do plano de manutenção elaborado;
- Checklist<sup>8</sup> incompleta e mal elaborada;
- Falta de material sobressalente;
- Mão-de-obra insuficiente;
- Má coordenação entre a Produção e a Manutenção.

---

<sup>8</sup> **Checklist** é a ordem de trabalho onde vêm todas as operações de manutenção a ser executadas num determinado equipamento.

Tendo sido identificados os problemas já mencionados, passou-se então para a implementação do modelo IPR, de maneira a encontrar a restrição e encontrar também possíveis resoluções.

## **5.2. Implementação do modelo IPR**

Tendo a informação necessária para aplicar o modelo, passou-se então, para as etapas do modelo, onde será escolhida(s) a(s) ferramenta(s) mais indicadas para o caso específico.

### **5.2.1. 1ª Etapa – Identificar**

Antes de se começar a pegar nos problemas mencionados anteriormente, é necessário analisar a realidade do sistema presente na organização. Com o contacto que foi feito com a organização, foi observado que existe alguma descoordenação entre o gestor de manutenção e os técnicos que executam as tarefas de manutenção. Esta descoordenação verifica-se pelo não seguimento das ordens de manutenção que são elaboradas pelo gestor. Com esta análise, identificou-se os tipos de restrições presentes no sistema, que são:

- Recursos;
- Material;
- Equipamentos.

Restrições de Material e de Equipamentos, estão presentes neste sistema, uma vez que no caso dos materiais, existem falta de material sobressalente em stock, o que provoca atrasos, e nos equipamentos, existe o problema de não estarem disponíveis, para executar as ordens de manutenção, nos prazos previstos devido ao excesso de produção.

Dentre estas restrições, foi escolhida a restrição de recursos para aplicar o modelo, visto que, é a restrição à partida, que está a provocar um maior estrangulamento em todos os sectores em funcionamento dentro da organização.

Para que se consiga identificar a raiz desta restrição, foi escolhida a ferramenta lógica CRT (Árvore da Realidade Atual). Tendeu-se para esta ferramenta, pois é uma ferramenta

em forma de diagrama gráfico de fácil compreensão e, também, por ser uma ferramenta de fácil utilização.

### **Árvore de Realidade Atual (CRT)**

Esta ferramenta pretende responder à pergunta “O que mudar?” e tem como objetivo identificar o Problema-Raiz do sistema.

Tal como já foi referido no Capítulo 3, esta estrutura lógica utiliza a relação causa-efeito-causa, ou “Se ... então ...” e descreve o estado atual das coisas destinadas a identificar a restrição do sistema (Problema-Raiz). A CRT mostra as ligações e os efeitos na operação em curso revelando as causas do problema.

Para que se consiga desenvolver o diagrama da CRT, são necessárias duas etapas, estas etapas são fundamentais para que se consiga desenvolver uma boa análise ao estado atual de um sistema.

#### **1ª Etapa**

A 1ª etapa desta ferramenta passa por elaborar a lista de Efeitos Indesejáveis (EI) enfrentados pelo sistema. Nesta etapa, para que se consiga enumerar todos os Efeitos Indesejáveis até se encontrar o Problema-Raiz (PR), será utilizada a ferramenta 5W (*five whys* ou Cinco Porquês).

A aplicação dos 5W é muito simples, mas deve ser sempre formal, na Figura 5.1, apresenta-se um exemplo de um documento simples que orienta a sua aplicação.

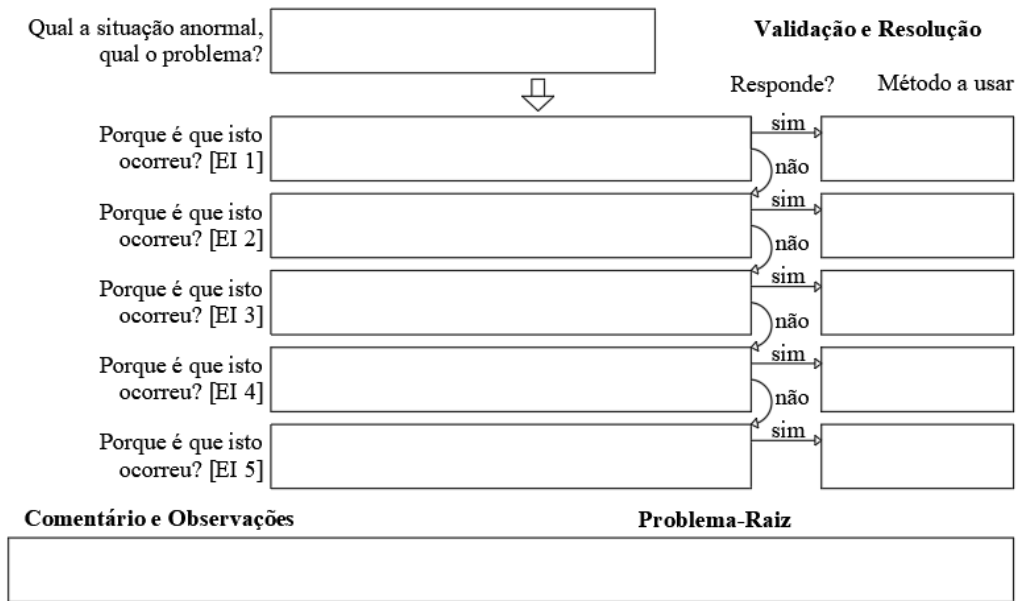


Figura 5.1 – Exemplo de um procedimento formal para aplicação dos 5W. Adaptado de Pinto (2016)

Segundo Pinto (2016), o procedimento dos 5W é o seguinte:

- 1 – Identificar o problema.
- 2 – Perguntar: “Porque é que aconteceu?” (Identificar todas os EIs possíveis).
- 3 – Para cada um dos EIs identificados, pergunte de novo: “Porque é que aconteceu?”.
- 4 – Repetir cinco vezes os passos 2 e 3. No final deverá ter identificado o(s) problema(s)-raiz, se não tiver identificado, continuar até identificar.
- 5 – Identifique a solução e as contramedidas para resolver o(s) problema(s)-raiz.

Realizados todos estes passos e conhecendo os EIs do sistema, pode-se então criar uma tabela com esses EIs. Nesta tabela começa-se por enquadrar os problemas que foram identificados na organização e, a partir destes fazer a pergunta “Porquê?” até que se consiga chegar ao Problema-Raiz.

Para começar a tabela é necessário escolher um dos problemas identificados na organização, e em seguida, encontrar os efeitos indesejáveis que provocam esse problema, até se conseguir encontrar o Problema-Raiz. Dos problemas identificados, foi escolhido o problema – baixa produtividade da manutenção – este problema está diretamente relacionado com os restantes problemas identificados, então será um excelente ponto de partida para a tabela.

Na Tabela 5.1, são listadas os EIs e as perguntas “Porquê?”, a eles relacionadas.

Tabela 5.1 – Aplicação dos 5W

	Efeito Indesejável	Porquê ( <i>Why</i> )?
1	Baixa produtividade da manutenção	Porque é que há baixa produtividade?
2	Mão-de-obra insuficiente	Porque é que há mão-de-obra insuficiente?
3	Incumprimento do plano de manutenção elaborado	Porque é que existe incumprimento?
4	Perda de tempo na preparação do material para a manutenção	Porque é que existe perda de tempo na preparação?
5	Falta de material sobressalente	Porque é que existe falta de material?
6	Falha de preparação da manutenção	Porque é que existe falha de preparação?
7	Checklist incompleta ou mal elaborada	Porque é que existe Checklists incompletas?
8	Gestão da manutenção inadequada	

Com a tabela terminada, consegue-se então construir uma relação de causa-efeito-causa entre os EIs enumerados. Usando esta relação da forma “**Se... então...**” consegue-se fazer uma leitura dos EIs da seguinte forma:

- **Se** existe falta de material sobressalente (EI 4), **então** existe uma política de gestão de *Stock* incorreta;
- **Se** existe mão-de-obra insuficiente (EI 2), **então** existe falta de contratação de mais elementos para a mão-de-obra;
- **Se** existe falha de preparação da manutenção (EI 6), **então** existe uma gestão da manutenção inadequada (EI 8);
- **Se** existe mão-de-obra insuficiente (EI 3) e falta de material sobressalente (EI 4), **então** há perda de tempo na preparação de material para a manutenção (EI 5);

- Se há falha na preparação da manutenção (EI 6), há baixa produtividade da mão-de-obra (EI 1) e há perda de tempo na preparação de material para a manutenção (EI 5), **então** há o incumprimento do plano de manutenção elaborado (EI 3);
- Se existe Checklists incompletas ou mal elaboradas (EI 7), **então** há uma gestão da manutenção inadequada (EI 8).

Realizando uma análise detalhada às relações descritas, consegue-se identificar o efeito indesejável como Problema-Raiz, que neste caso é o responsável pela maioria dos restantes EIs.

## **2ª Etapa**

A 2ª etapa da ferramenta CRT, passa pela elaboração de um diagrama, em que são colocados os EIs definidos na etapa anterior. Este diagrama é criado de cima para baixo, em que na parte superior é colocado o EI (objetivo a não alcançar), em baixo, no fim do diagrama, é colocado o EI responsável pela maioria dos outros EIs identificados na tabela.

Com os EIs definidos na Tabela 5.1, consegue-se então esquematizar o diagrama referente à CRT. A partir da CRT (Figura 5.2) consegue-se identificar o Problema-Raiz como sendo “Gestão da manutenção inadequada” (EI 8).

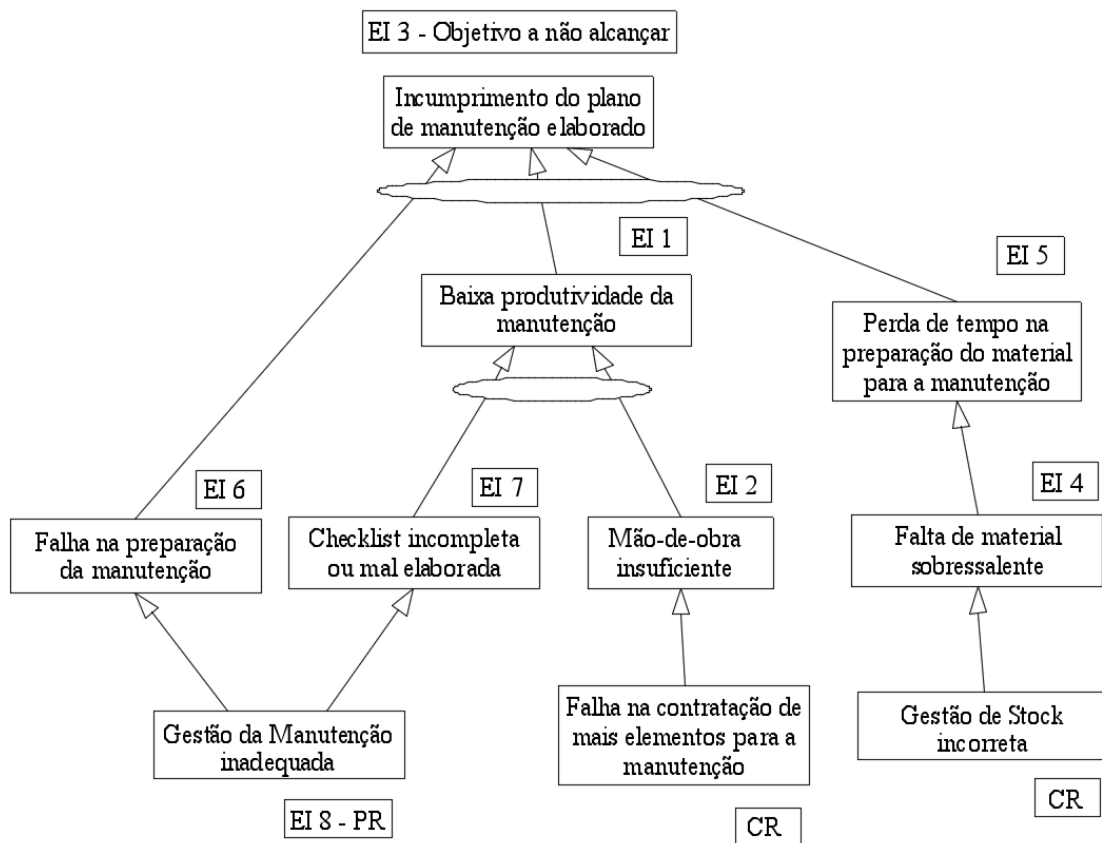


Figura 5.2 – Diagrama da CRT

O diagrama da Figura 5.2, deverá ser lido de baixo para cima, como indicam as setas, e deverá ser interpretado da maneira como é explicado na Figura 5.3.

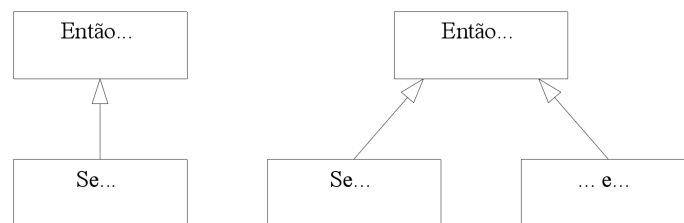


Figura 5.3 – Como ler a CRT


Com uma análise detalhada ao diagrama da CRT, consegue-se verificar que se tem o Problema-Raiz (PR) como “Gestão da Manutenção inadequada”, mas têm-se também duas Causas-Raiz (CR), estas CR estão relacionadas com o problema, inicialmente selecionado, e mesmo não originando tantos efeitos indesejáveis como o PR, deverão ser tidas em conta quando se passar para a segunda etapa do modelo.

### 5.2.2. 2ª Etapa – Planear

Nesta etapa, pretende-se encontrar soluções que visem responder à restrição identificada na etapa anterior. Neste caso a restrição que se tem presente é constituída por um Problema-Raiz e por duas Causas-Raiz, ambas devem ser tidas em conta, e se possível resolvê-las em conjunto, caso não seja possível, deverá ser dada prioridade sempre ao PR, pois é responsável por um número maior de efeitos indesejáveis.

Continuando com a mesma análise e pensamento usado na primeira etapa, opta-se pelas ferramentas lógicas – CRD e FRT – para encontrar as soluções e planear a melhor maneira de as aplicar.

#### **Diagrama de Resolução de Conflitos (CRD)**

Esta estrutura lógica visa responder à pergunta “Para o que mudar?”. O CRD identifica o conflito (seta zig-zag ou seta de mão dupla ) que impede a resolução do Problema-Raiz identificado pela CRT.

Este diagrama passa por identificar os requisitos e pré-requisitos do sistema de maneira a que se consiga chegar ao objetivo. Tendo os requisitos e pré-requisitos do sistema passa-se por escolher a “injeção” necessária para combater o Problema-Raiz.

Neste contexto, entende-se “injeção” pela proposta de resolução, ou solução, a aplicar de maneira a que se combata o Problema-Raiz. Esta “injeção” pode ser introduzida em qualquer uma das ligações entre os requisitos, mas deverá ser sempre aplicada no conflito.

Com base na CRT, sabendo que o Problema-Raiz é a “gestão da manutenção inadequada”, fica-se com uma impressão de que é um problema “fácil” de resolver. Na prática as coisas não são assim tão simples, uma vez que poderá existir algum conflito que impeça a implementação de medidas que visem melhorar a gestão da manutenção.

O objetivo a alcançar com o CRD é “Gestão da Manutenção adequada”, que é o oposto do Problema-Raiz identificado pela CRT. Como pode ser observado na Figura 5.4, o diagrama deve ser interpretado assim:

- A para B: para que se consiga uma gestão da manutenção adequada (Objetivo A), deve existir um sistema de gestão da manutenção alinhado com as normas da organização (Requisito B);

- A para C: para que se consiga uma gestão da manutenção adequada (Objetivo A), devem ser implementadas as melhores práticas de gestão da manutenção (Requisito C).

Para que se consiga obter o objetivo A, tem que se cumprir com as duas condições anteriores. O conflito ocorre quando se conjuga os pré-requisitos respectivos dos requisitos B e C.

- B para D: para que se tenha um sistema de gestão alinhado com as normas da organização é necessário que se consiga implementar um sistema de gestão da manutenção novo, a longo prazo (Pré-requisito D);
- C para D': para que se consiga implementar as melhores práticas de gestão da manutenção é necessário que se consiga implementar um sistema de gestão da manutenção novo, a curto prazo (Pré-requisito D').

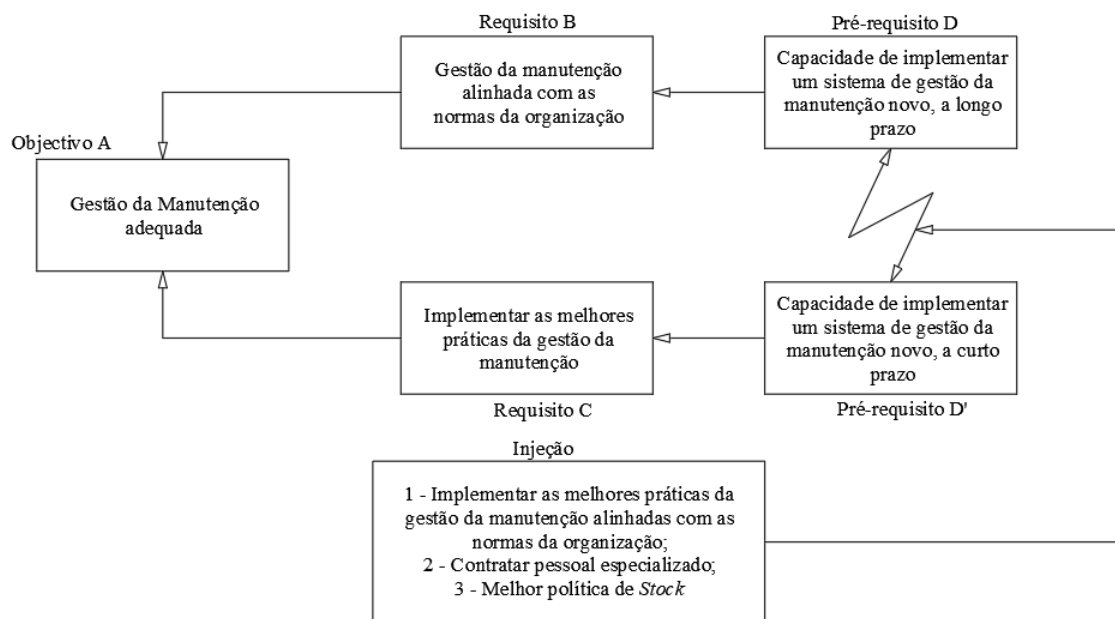


Figura 5.4 – Diagrama para o CRD.

O objetivo do CRD é solucionar o conflito entre os Pré-requisitos D e D', este conflito é resolvido através da “Injeção”. Sendo assim, neste caso, a “Injeção” são 3 hipóteses que visam combater, tanto o Problema-Raiz, como também as Causas-Raiz, sendo assim as “Injeções” são:

- 1 – “Implementação das melhores práticas da gestão da manutenção alinhadas com as normas da organização”;

2 – “Contratar pessoal especializado”;

3 – “Melhorar política de Stock”.

Assim deverá ser atingido o objetivo A. Esta “Injeção” quebra o pré-requisito D’ que era necessário para o Requisito C.

A “Injeção” obtida no CRD servirá de base para a construção da Árvore de Realidade Futura (FRT), e transformará os efeitos indesejáveis (EIs) em efeitos desejáveis (EDs).

### **Árvore de Realidade Futura (FRT)**

A FRT testa a solução (“Injeção”) para determinar se ocorrerá a alteração desejada de EIs para EDs, conseguindo assim alcançar uma “meta desejada”. A FRT tem como objetivo:

- Prevenir obstáculos que impeçam um determinado “curso” de ação;
- Identificar as condições necessárias para superar ou neutralizar os obstáculos do curso de ação, objetivo ou “Injeção”;
- Identificar uma sequência de ações requeridas para um determinado curso;
- Servir de “elo” com a Árvore de Transição (TT) que apresenta o plano de ação passo a passo.

Um dos pontos mais importantes nesta ferramenta, é que permite testar as “Injeções” sem que para tal sejam comprometidos recursos. Nesta ferramenta, vai-se testar a “Injeção” com o intuito de observar se conseguirá “transformar” os EIs em EDs, e assim conseguir chegar a um objetivo desejado. Tal como foi referido no CRD, a “Injeção” aplicada visa, combater o Problema-Raiz e também as duas Causas-Raiz descobertas pela CRT.

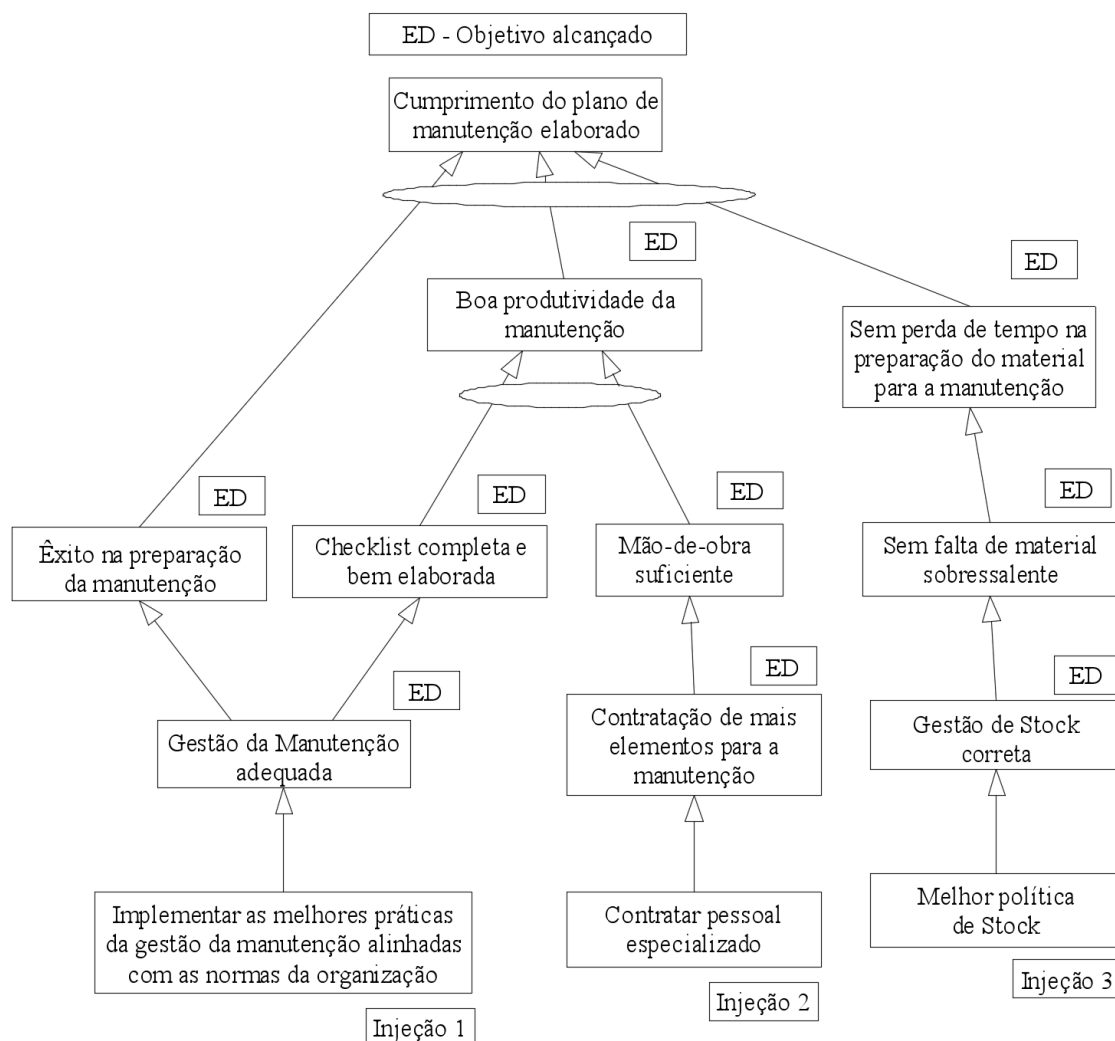


Figura 5.5 – Diagrama para a FRT.

A leitura e análise do diagrama da FRT deverá ser feito da mesma maneira que se fez a análise do diagrama da CRT, isto é, fazer a leitura de baixo para cima. Tal como já foi referido, este diagrama serve para testar as “Injeções”, e assim, verificar se ao serem aplicadas poderão vir a chegar ao resultado pretendido. Como pode ser observado na Figura 5.5, com a aplicação da “Injeção” consegue-se quebrar o PR e as CR e, assim, transformar os EIs em EDs, tendo sido alcançado o objetivo pretendido.

Tendo sido concluído o diagrama referente à Árvore de Realidade Futura, conclui-se assim a 2ª etapa do modelo em estudo. A terceira e última etapa, visa resolver o problema encontrado na primeira etapa, recorrendo à análise efetuada na segunda etapa.

### 5.2.3. 3ª Etapa – Resolver

Nesta última etapa do modelo IPR, cabe verificar os obstáculos que apareçam à implementação das soluções e, verificar a nova realidade do sistema. Tal como já têm vindo a ser mencionado várias vezes, as ferramentas de pensamento lógico são uma escolha importante, pois o facto de serem em formato de diagrama gráfico, torna-as fáceis de interpretar até por pessoas fora da área de aplicação destas ferramentas.

#### **Árvore de Pré-Requisitos (PRT)**

A Árvore de Pré-Requisitos, tem como objetivo responder à pergunta: “Como mudar?”. A PRT pretende visualizar possíveis obstáculos (Obs) a serem ultrapassados, e servir de “elo” entre a proposta da FRT com a TT.

Antes de iniciar a construção da PRT, é necessário analisar as “Injeções” que foram aplicadas na FRT. Analisar aquelas que são de fácil resolução e escolher aquela que à partida será mais difícil de aplicar. Tendo sido feita a seleção pode-se então criar a PRT.

Para que se entenda melhor o funcionamento da PRT, não foi feita uma seleção da “Injeção” e foi feita a PRT para as três “Injeções” aplicadas na FRT.

Tal como já foi referido anteriormente, na PRT deve-se construir uma coluna ao lado esquerdo intitulada de Obstáculo (Obs), listando todas as razões pelas quais não é possível a execução da “Injeção” (essas são os obstáculos). Para cada obstáculo deve-se fazer uma lista numa coluna à direita com as condições para que eles sejam superados. Caso não se consiga a condição para a superação do obstáculo, considera-se o oposto do respetivo obstáculo, esses são chamados de Objetivos Intermediários (OIs).

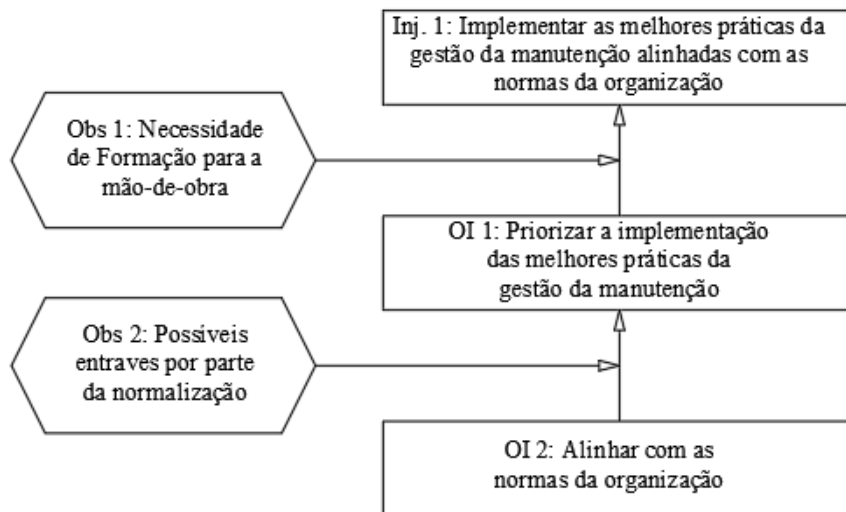


Figura 5.6 – Diagrama para a PRT para a 1ª "Injeção".

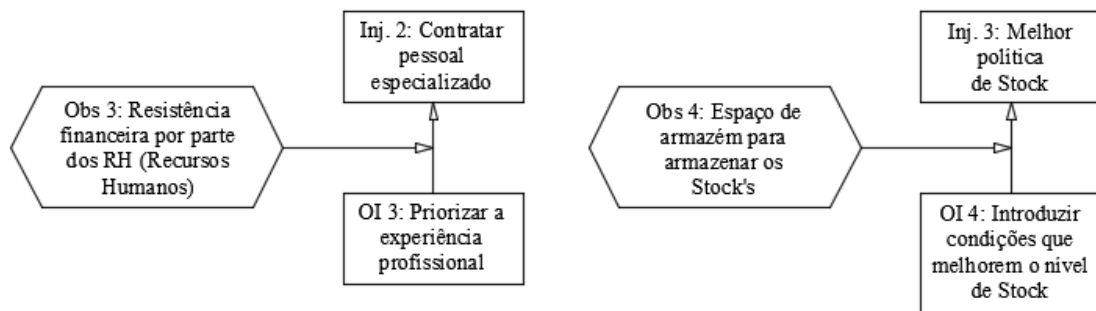


Figura 5.7 – Diagrama para a PRT para a 2ª e 3ª "Injeção".

A partir da Figura 5.6 e da Figura 5.7, consegue-se observar que a “Injeção” que pode vir a trazer maior nível de dificuldade na implementação é a 1ª “Injeção”, uma vez que têm associados mais obstáculos que as restantes.

Com a ferramenta PRT, conseguiu-se descortinar todos os obstáculos à implementação das três “Injeções”. Com esses obstáculos foi possível então aplicar a Árvore de Transição, com ela consegue-se encontrar as ações necessárias para conseguir ultrapassar os obstáculos e assim mudar a realidade do sistema em estudo.

### Árvore de Transição (TT)

A TT é um processo aditivo, combinando cada efeito sucessivo, esperado, com subsequentes ações específicas que implementam a FRT. Assim, para cada obstáculo previsto, há um objetivo intermediário a ser alcançado e, dependendo do número de OIs e de obstáculos, as árvores podem se tornar muito amplas, por isso, se torna necessário utilizar, somente, os principais OIs.

Aqui, propõe-se executar as “Injeções” selecionadas atendendo aos objetivos intermediários e prevenindo a origem de possíveis, novos, efeitos indesejáveis.

A Árvore de Transição mostra as ações concretas que devem ser implementadas a fim de se alcançar os objetivos intermédios propostos e quem são os responsáveis por tais intervenções.

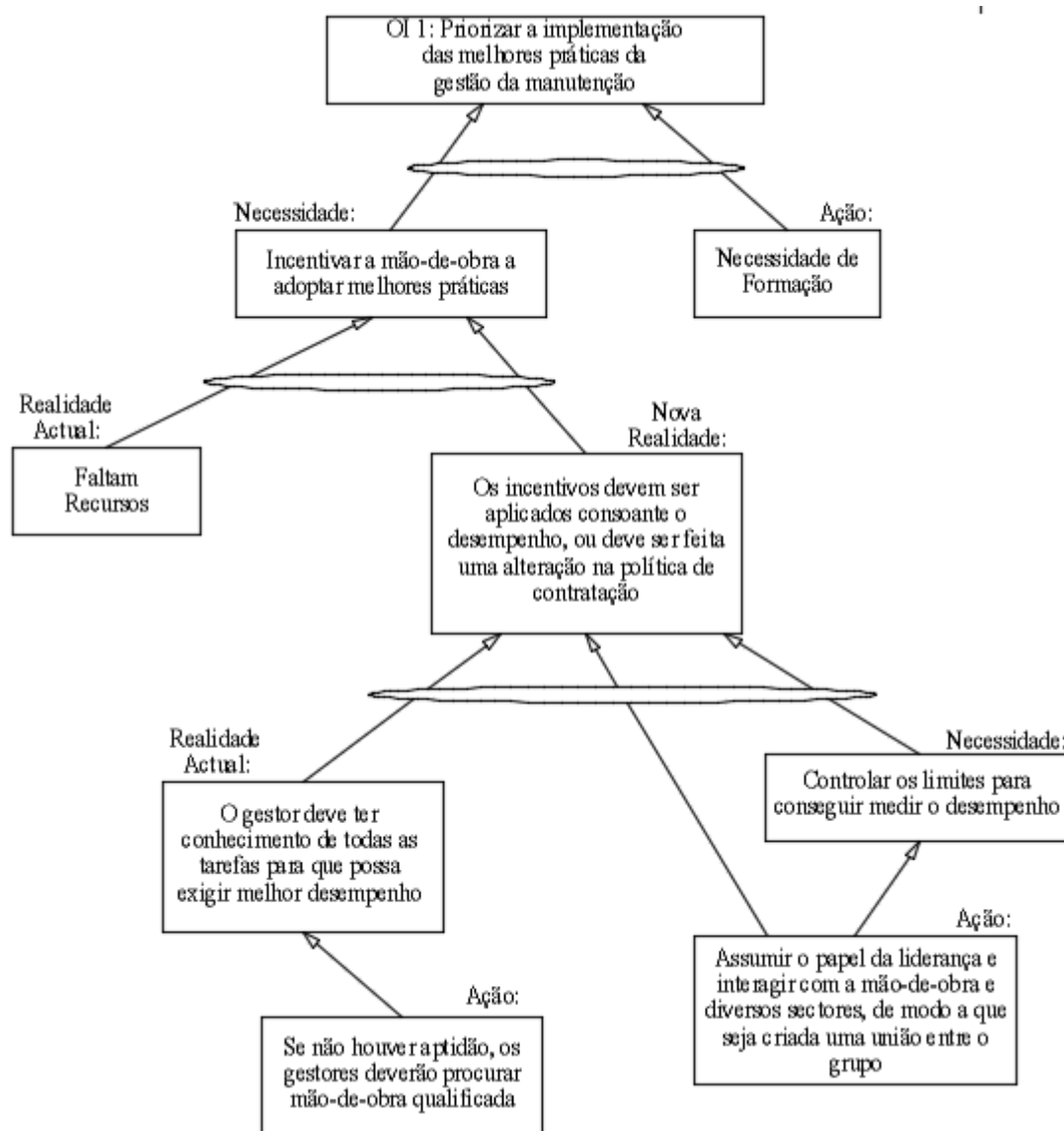


Figura 5.8 – Diagrama para a TT.

Como pode ser visto na Figura 5.8, as conexões lógicas, para o objetivo intermediário escolhido, são confirmadas usando a estrutura de pensamento, “Se... Então...”, assim, as conexões podem ser testadas para os restantes objetivos intermediários, apresentando, no todo, a resposta à pergunta “Como mudar?”. Para que exista a “mudança” desejada, é necessário que a Realidade Actual seja alterada, isto é, a partir da(s) ação(ões) realizada(s)

sobre a Realidade Atual passa-se a ter uma Nova Realidade, com o intuito de alcançar o objetivo intermediário escolhido.

Realizando o diagrama da TT, consegue-se então verificar a mudança de realidade do sistema, contudo, não houve tempo suficiente para conseguir verificar se a alteração prevista nos diagramas, anteriormente, apresentados, se traduz igual na organização, ou seja, as alterações previstas nos diagramas podem não ocorrer da mesma maneira na prática.

Devido a esse fato, não foi possível continuar com o processo iterativo do modelo IPR, caso tivesse sido possível, poderia ter sido identificada uma nova restrição e então voltar à primeira etapa do modelo, desenvolvendo passo a passo todas as etapas do modelo, como aqui foi feito anteriormente.



## 6. Conclusão

O estudo realizado teve como principal objetivo analisar a utilização das ferramentas da Teoria das Restrições, no contexto de identificação e resolução de problemas referentes à gestão da manutenção. Neste estudo foram utilizadas as ferramentas da estrutura lógica da TOC, que serviram para analisar os problemas de gestão identificados na organização.

Estas ferramentas, para os problemas identificados, são a melhor opção para apresentar resultados. A sua estrutura em forma de diagrama gráfico, torna a que sejam de fácil leitura e muito úteis para se conseguir simular possíveis soluções a aplicar.

Este estudo, teve como principal limitação o fator tempo, e para que se conseguisse uma intervenção bem-sucedida na organização, seria necessária conhecer e respeitar, as características e limitações definidas pela direção da organização. Assim, tem que se tomar em consideração que “um dos maiores obstáculos para uma implementação bem-sucedida, é superar a resistência à mudança. A chave está em saber como orientar a dinâmica da interação entre pessoas com diferentes objetivos e níveis de entendimento” (Goldratt & Cox, 2004).

No caso deste estudo, é imperativo que haja entendimento interno, pois cabe ao gestor levar a instituição para o cumprimento dos seus objetivos. Provavelmente, poderiam ser alteradas algumas imposições iniciais, mas mesmo assim, seria necessário que fossem apresentados os fatores positivos de realizar a alteração dos parâmetros de trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de outros estudos com a mesma metodologia, mas que se consiga observar resultados das alterações efetuadas, que neste caso devido ao fator tempo não foi possível obter resultados práticos.



## Referências Bibliográficas

- Bhardwaj, A., Gupta, A., & Kanda, A. (2010). Drum-Buffer-Rope: The Technique to Plan and Control the Production Using Theory of Constraints. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 45, 103-106.
- Busso, C., Miyake, D. (2012). Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness na gestão de desempenho global de uma fábrica. *Produção* 23(2), 205-225.
- Cabral, J. (2006). *Organização e Gestão da Manutenção*. Lisboa: 6ª Edição, Lidel – Edições Técnicas, Lda.
- Carmo, L., Machado, R., Cogan, S. (2015). Uma análise do processo de elaboração do trabalho de conclusão de curso a partir do processo de raciocínio da Teoria das Restrições. *Registro Contrábil – Ufal* 6(3), 83-99.
- Cox, J., & Schleier, J. (2010). *Theory of Constraints Handbook*. McGraw-Hill Educations.
- Delisle, D., Freiberg, V. (2014). Everything is 5S: A Simple yet Powerful Lean Improvement Approach Applied in a Preadmission Testing Center. *Quality Management Journal*, 21(4), 10-22.
- Deming, E. (1986). *Out of the Crisis*. Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Study.
- Dettmer, W. (2007). *The Logical Thinking Process, A systems approach to complex problema solving*. American Society for Quality, Quality Press.
- Didelet, F., & Viegas, J. (2003). *Manutenção* (1st ed.). Retrieved from [http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/private/folhas\\_manutencao.pdf](http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/private/folhas_manutencao.pdf)
- Escobar, V., Vega, P., Zamora, M. (2015). Applying the Theory of Constraints to the logistic service of medical records of a hospital. *European Research on Management and Business Economics* 22, 139-146.
- Fitch, J. (2008). *Manutenção Pró-Activa pode economizar 10 vezes mais do que práticas de manutenção preditivas/preventivas convencionais*.

- Goldratt, E. (1990). *The Haystack Syndrome: Sifting information out of the data ocean*. Croton-on-Hudson, N.Y.: North River Press.
- Goldratt, E., & Cox, J. (2004). *The goal: a process of ongoing improvement* (3rd rev. ed.). Aldershot: Gower.
- Goldratt, E., & Fox, R. (1986). *The Race*. Croton-on-Hudson, N.Y.: North River Press.
- Goldratt Institute, A. (2009). *Combining Lean, Six Sigma, and the Theory of Constraints to Achieve Breakthrough Performance* [Press release]. Retrieved from <https://www.goldratt.com/pdfs/CombiningLSSandTOC.pdf>
- Gupta, A., Bhardwaj, A., & Kanda, A. (2010). Fundamental Concepts of Theory of Constraints: An Emerging Philosophy. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 46, 686-692.
- Hu, X., Demeulemeester, E., Cui, N., Wang, J., Tian, W. (2016). Improved critical chain buffer management framework considering Resource costs and Schedule stability. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Springer, 1-25.
- Izmailov, A. (2014). If your Company is considering the Theory of Constraints. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 150, 925-929.
- Izmailov, A., Korneva, D., Kozhemiakin, A. (2016). Effective Project Management with Theory of Constraints. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 229, 96-103.
- Kardec, A., Nascif, J. (2003). *Manutenção: função estratégica*. Qualitymark.
- Leão, N., Andrade, J. (2015). Aplicação da FMEA e análise de falhas em um equipamento de trafilagem para estabelecimento de estratégias de manutenção: estudo de caso. *Revista Espacios* 36(8).
- Mabin, V., Forgeson, S., Green, L. (2001). Harnessing resistance: using the theory of constraints to assist change management. *Journal of European Industrial Training* 25(4), 168-191.
- Mathur, A., Dangayach, G., Mittal, M., Sharma, M. (2011). Performance measurement in automated manufacturing. *Measuring Business Excellence* 15, 77-91.
- McMullen, T. (1998). *Introduction to the theory of constraints (TOC) management system*. London: St. Lucie.

- Melton, T. (2005). The Benefits of Lean Manufacturing What Lean Thinking has to Offer The Process Industries. World Congress of Chemical Engineering, 662-673. Glasgow: Chemical Engineering Research and Design.
- Millstein, M., Martinich, J. (2014). Takt Time Grouping: implementing kanban-flow manufacturing in na unbalanced, high variation cycle-time process with moving constraints. *Internacional Journal of Production Research* 52(23), 6863-6877.
- Moss, K. (2007). Improving Service Quality with the Theory of Constraints. *Journal of Academy of Business and Economics*, 7(3).
- Nakajima, S. (1993). Introduction to TPM, Productive Press. Cambridge: MA.
- Naor, M., Bernardes, E., Coman, A. (2013). Theory of Constraints: is it a theory and a good one?. *International Journal of Production Research* 51(2), 542-554.
- NP EN 13306:2010 – Norma Portuguesa – Terminologia da Manutenção.
- Parkinson, N. (1957). Parkinson's Law. Boston: Houghton Mifflin.
- Peng, W., Huang, M. (2013). A critical chain project scheduling method based on a differential evolution algorithm. *Internacional Journal of Production Research* 52(13), 3940-3949.
- Pinto, J. (2009). Pensamento Lean - A filosofia das organizações vencedoras. Lisboa, Lidel – Edições Técnicas, Lda.
- Pinto, J. (2016). Manutenção Lean. Lisboa, Lidel – Edições Técnicas, Lda. 1ª Edição de Março de 2013, Reimpressão de Abril de 2016.
- Pirasteh, R., Farah, K. (2006). Continuous improvement trio: the top elements of TOC, lean, and six sigma make beautiful music together. *APICS Magazine*, 31–33.
- Rahman, S. (1998). A review of the theory of constraints philosophy and its application. *International Journal of Operations & Production Management* 18(4), 336-355.
- Reid, R. (2007). Applying the TOC five-step focusing process in the service sector: A banking subsystem. *Managing Service Quality* 17(2), 209–234.
- Ricketts, J. (2008). Reaching the Goal: how managers improve a services business using Goldratt's theory of constraints. Upper Saddle River, NJ: IBM Press.

- Roldão, V., & Ribeiro, J. (2007). *Gestão das Operações uma abordagem integrada*. Lisboa: Monitor.
- Şimşit, Z., Günay, N., Vayvay, Ö. (2014). Theory of Constraints: A Literature Review. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 150, 930-936.
- Singh, R., Gohil, A., Shat, D., Desai, S. (2013). Total Productive Maintenance (TPM) in a Machine Shop: A Case of Study. *Procedia Engineering* 51, 592-599.
- Siqueira, I. (2009). *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação, Qualitymark*.
- Souza, V. (2011). *Organização e Gerenciamento da Manutenção: Programa e Controle de Manutenção, 4ª Edição*. All Printe Editora, São Paulo.
- Sproull, R. (2009). *The ultimate improvement cycle: maximizing profits through the integration of lean, six sigma, and the theory of constraints*. CRC Press.
- Srebrenkoska, S., Kochov, A., Minovski, R. (2016). Six Sigma and Design of Experiments for improving the Production of composite pipes. *Journal for Technology of Plasticity* 41(2), 11-18.
- Šukalová, V., Ceniga, P. (2014). Application of the Theory of Constraints instrument in the Enterprise distribution system. *Procedia Economics and Finance* 23, 134-139.
- Talyuli, H., Alves, N., Lemos, M. (2010). *Aplicação da Teoria das Restrições na Gestão da Manutenção: uma Abordagem Teórica*. Enegep 2010 – XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção.
- Tavares, A. (2005). *A Evolução da Manutenção*. *Revista Nova Manutenção e Qualidade?* N°54.
- Taylor, L. e Asthana, R. (2016). Applying Theory of Constraints principles and Goldratt's thinking process to the problems associated with inventory control. *Franklin Business & Law Journal*.
- Tenera, A., Abreu, A. (2008). A TOC Perspective to Improve the Management of Collaborative Networks. *Working Conference on Virtual Enterprise*, 167-176.
- TOCICO. (2012). *The Theory of Constraints International Certification Organization Dictionary (Second ed.)*. McGraw-Hill Education.

- Veldman, J., Wortmann, H., Klingenberg, W. (2011). Typology of conditions based Maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 27(2), 183-202.
- Watson, K., Blackstone, J., & Gardiner, S. (2007). The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of Operations Management* 25(2), 387-402.
- Woepfel, M. (2009). How to Double Your Bottom Line with TLS. Pinnacle Strategies.
- Wu, H., Chen, C., Tsai, C., & Yang, C. (2010). Simulation and scheduling implementation study of TFT-LCD Cell plants using Drum–Buffer–Rope system. *Expert Systems with Applications* 37(12), 8127-8133.
- Youngman, K. (2009). A Guide to Implementing the Theory of Constraints (TOC). Consulting 2017 in March and April, from <http://www.dbrmfg.co.nz/>.