



**Diana Filipa Clemente Pinto Palma Borralho**

Licenciada em Ciências da Engenharia  
Eletrotécnica e de Computadores

## **Gestão Avançada do Ciclo de Vida de Unidades de Produção**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Rui Neves Silva, Professor  
Associado, Faculdade de Ciências e  
Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira  
- FCT/UNL

Arguente: Doutor José Manuel Matos Ribeiro da  
Fonseca - FCT/UNL

Orientador: Doutor Rui Alexandre Nunes Neves da  
Silva - FCT/UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março, 2019**



### **Gestão Avançada do Ciclo de Vida de Unidade de Produção**

Copyright © Diana Filipa Clemente Pinto Palma Borralho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”*

*Isaac Newton*



## Agradecimentos

Para a realização da uma dissertação, existem sempre pessoas que nos ajudam de uma outra forma. É necessário existir alguém que esteja dentro do assunto para dar alguma orientação, uma estrutura familiar que seja um suporte emocional e amigos que nos ajudem a lidar com o stress e a ansiedade que vão aparecendo.

Em primeiro lugar, gostava de agradecer ao meu orientador, Professor Rui Neves da Silva, que para além da paciência e a motivação, que me transmitiu e que me fez concluir o projeto, mostrou-se sempre disponível para me ajudar a conciliar a realização da dissertação com o meu emprego.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela organização que permite aos alunos terem apoio para este tipo de projetos.

A todos os meus colegas de trabalho que estiveram presentes durante estes cinco anos e que superaram todas as etapas com grande companheirismo.

Queria também agradecer à minha família e amigos por se terem preocupado com o meu bem-estar durante a realização deste projeto e por todo o apoio que recebi e que me fez ter motivação para a sua conclusão.



## Resumo

---

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito dos Sistemas de Manutenção e o seu objetivo foi criar uma ferramenta que permita aferir sobre “Qual a melhor estratégia de manutenção a utilizar de modo a obter o menor custo possível?”.

Para desenvolver o algoritmo era necessário ter uma amostra para testes e, por isso, foi desenvolvido um simulador para gerar dados. Estes dados basearam-se na produtividade, custos e nas falhas que iam ocorrendo ao longo do tempo. Foi necessário desenhar um modelo para as máquinas e introduzir ruído de modo a torná-las o mais reais possível.

A ferramenta desenhada recebeu dados das máquinas e através de um Algoritmo Genético gerou as estratégias a serem aplicadas durante os testes. Para aferir qual a estratégia mínima associada ao menor custo, foi aplicado o Método dos Mínimos Quadrados.

Após obter o resultado da ferramenta criada, este foi comparado com outras duas Estratégias de Manutenção, *Run-To-Failure* e Manutenção Baseada em Condições. Este passo foi importante para verificar que o algoritmo estava a funcionar corretamente e quais os benefícios de o utilizar. Foram comparados quatro Indicadores de Desempenho: Tempo Médio entre Avarias (MTBF), o Tempo Médio entre Manutenções (MTBM), Taxa de Avaria (FR) e a Disponibilidade (A), para além dos custos entre as três estratégias e verificou-se que o algoritmo estava de acordo com as expectativas.

O projeto desenvolvido é útil não só a nível da ferramenta implementada que dá uma estratégia aproximada do ideal, como o simulador desenhado permite fazer simulações individuais para qualquer caso que se queira testar.

**Palavras-chave:** Sistemas de Manutenção, Estratégias de Manutenção, Indicadores de Desempenho, Sistemas Automatizados, Algoritmo Genético, Método dos Mínimos Quadrados.

---



# Abstract

---

This dissertation was developed in the scope of Maintenance Systems. Its goal was to create a tool that could answer the question: “What is the best maintenance strategy to use that generates the lowest possible cost?”.

A test dataset was required to build the algorithm, so a simulator that generates data was created. The data was based on productivity, costs and appearing failures over time. A model to represent the machines was built, white-noise was considered in the model to make it a trustworthy representation of reality.

The conceived tool received data from the machines and through a Genetic Algorithm it presented strategies to be applied during the tests. The Least Squares Method was applied in order to find out which strategy has the lowest cost.

After obtaining the result from the created tool, it was compared to two other maintenance strategies, Run-To-Failure and Condition-Based Maintenance. This step was important to validate the algorithm performance and the benefits of using the chosen algorithm.

Four Performance Indicators: Mean Time Between Failere (MTBF), Mean Time Between Maintenance (MTBM), Taxe Failure (TF) and Availability (A), besides the cost, were compared among the three selected strategies and the algorithm performance was, once again, validated. This project is meaningful due to the created tool, that will generate an almost ideal strategy, but also because of the conceived simulator which allows to run individual simulations to any given case.

**Keywords:** Maintenance Systems, Maintenance strategies, Key Performance Indicators, Automatized Systems, Genetic Algorithms, Least Squares Method.



# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>vii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>ix</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xi</b>
<b>Conteúdo</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xix</b>
<b>Lista de Siglas</b> .....	<b>xx</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Contexto e Motivação .....	1
1.2 Objetivos e Abordagem.....	2
1.3 Contribuições.....	2
1.4 Estrutura do Documento .....	2
<b>2. Estado de Arte</b> .....	<b>5</b>
2.1 Indicadores de Desempenho dos Equipamentos.....	6
2.1.1. Tempo Médio de Reparação .....	6
2.1.2. Tempo Médio entre Avarias .....	7

2.1.3.	Tempo Médio entre Manutenções .....	7
2.1.4.	Tempo Médio de Manutenção .....	8
2.1.5.	Tempo médio de Inatividade.....	8
2.1.6.	Taxa de Avaria .....	8
2.1.7.	Disponibilidade.....	8
2.1.8.	Custo Operacional do Tempo de Inatividade .....	10
2.1.9.	Desempenho .....	10
2.1.10.	Qualidade .....	11
2.1.11.	Risco .....	11
2.1.12.	Fator de Segurança.....	12
2.1.13.	Confiabilidade.....	12
2.1.14.	Eficácia Geral do Equipamento .....	13
2.2	Estratégias de Manutenção Reativas .....	13
2.2.1.	<i>Manutenção de Avarias</i> .....	14
2.2.2.	Manutenção Corretiva .....	15
2.3	Estratégias de Manutenção Proativas.....	16
2.3.1.	<i>Manutenção Preventiva</i> .....	17
2.3.2.	<i>Manutenção Preditiva</i> .....	18
2.4	Estratégias de Manutenção Agressivas.....	19
2.4.1.	Manutenção baseada no Tempo.....	21
2.4.2.	Manutenção baseada em Condições .....	22
2.4.3.	Manutenção centrada na Confiabilidade .....	23
2.4.4.	Manutenção Produtiva Total.....	24
2.4.5.	Manutenção baseada no Risco.....	26
2.5	Algoritmos .....	29
2.5.1.	Algoritmo Genético .....	30
2.5.2.	Método dos Mínimos Quadrados .....	32
2.6	Trabalhos relacionados.....	33
2.6.1.	Sistema de Gestão de Manutenção Informatizada .....	33
2.6.2.	Na Indústria .....	34

<b>3.</b>	<b>Abordagem.....</b>	<b>35</b>
3.1	Cenário de Estudo .....	35
3.2	Equipamento .....	37
3.3	Ferramenta de Apoio à Decisão .....	39
3.3.1.	Estratégias de Manutenção.....	39
3.3.2.	Indicadores de Desempenho.....	40
3.3.3.	Algoritmo Genético .....	40
3.3.4.	Método dos Mínimos Quadrados .....	42
<b>4.</b>	<b>Desenvolvimento.....</b>	<b>45</b>
4.1	Esquema Geral.....	45
4.2	Simulador.....	45
4.3	MDS .....	49
<b>5.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>53</b>
5.1	Primeira Fase .....	53
5.2	Segunda Fase.....	54
5.3	Discussão de Resultados.....	60
<b>6.</b>	<b>Considerações Finais.....</b>	<b>63</b>
6.1	Conclusões.....	63
6.2	Proposta de Trabalhos Futuros .....	64
<b>7.</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>67</b>
<b>A.</b>	<b>Funcionamento do MDS .....</b>	<b>73</b>
<b>B.</b>	<b>Funcionamento do Simulador .....</b>	<b>75</b>
A1.	Ecrã “Generic”.....	75
A2.	Ecrã “Parameters” .....	77
A3.	Ecrã “Results” .....	78
A4.	Ecrã “Technical Details” .....	78



## Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 - Linha temporal com especificação do tempo de reparação.</i> .....	6
<i>Figura 2.2 - Linha temporal com especificação do tempo de funcionamento.</i> .....	7
<i>Figura 2.3 - Linha temporal com especificação do tempo de funcionamento e de reparação.</i> .....	9
<i>Figura 2.4 - Curva de Confiabilidade do equipamento.</i> .....	12
<i>Figura 2.5 - Conjunto de estratégias Reativas.</i> .....	14
<i>Figura 2.6 - Conjunto de estratégias proativas.</i> .....	17
<i>Figura 2.7 - Conjunto de estratégias agressivas.</i> .....	20
<i>Figura 2.8 - Ciclo de vida de um equipamento.</i> .....	22
<i>Figura 2.9 - Algoritmo descritivo da RBM.</i> .....	27
<i>Figura 2.10 - Matriz para a avaliação do risco.</i> .....	28
<i>Figura 2.11 – Análise da árvore de falhas reversa.</i> .....	29
<i>Figura 2.12 - Avaliação da população de cromossomas.</i> .....	30
<i>Figura 2.13 - Seleção dos cromossomas a partir da avaliação.</i> .....	31
<i>Figura 2.14 - Cruzamento cromossómico a nível computacional.</i> .....	31
<i>Figura 2.15 - Mutação genética a nível computacional.</i> .....	31
<i>Figura 3.1 - Esquemático geral do projeto.</i> .....	36
<i>Figura 3.2 - Curva do desgaste das peças em estudo.</i> .....	37
<i>Figura 3.3 - Funcionamento do Algoritmo Genético.</i> .....	41
<i>Figura 4.1 - Algoritmo do equipamento.</i> .....	46
<i>Figura 4.2 - Ecrã "Generic".</i> .....	47

Figura 4.3 - Ecrã "Parameters" referente a um equipamento.....	47
Figura 4.4 - Ecrã "Results" referente a um equipamento.....	48
Figura 4.5 - Ecrã "Technical Details" referente a um equipamento. ....	48
Figura 4.6 - Ecrã com os resultados dos custos e indicadores.....	48
Figura 4.7 - Ecrã "MDS".....	49
Figura 4.8 - Algoritmo do MDS.....	50
Figura 7.1 - Resultado final da aplicação do MDS.....	73
Figura 7.2 - Visualização das máquinas no ecrã "Generic". ....	75
Figura 7.3 - Botões de controlo no ecrã "Generic".....	76
Figura 7.4 - Controlo de parâmetro no ecrã "Generic". ....	76
Figura 7.5 - Botões de estratégias no ecrã "Generic". ....	77
Figura 7.6 - Ecrã "Parameters".....	77
Figura 7.7 - Ecrã "Results".....	78
Figura 7.8 - Ecrã "Technical Details". ....	79

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Estratégias proativas utilizadas em cada metodologia.....	20
Tabela 3.1 – Tabulação do Valor Crítico para cada constituinte do equipamento.....	38
Tabela 3.2 - Tabulação dos custos para cada tipo de manutenção.....	39
Tabela 5.1 - Resultados de custos do MDS.....	54
Tabela 5.2 - Resultados de Custos da Simulação.....	55
Tabela 5.3 - Resultados de MTBF da Simulação.....	56
Tabela 5.4 - Resultados de MTBM da Simulação.....	57
Tabela 5.5 - Resultados de Taxa de Avaria da Simulação.....	58
Tabela 5.6 - Resultados de Disponibilidade da Simulação.....	59
Tabela 5.7 - Resumo dos resultados obtidos.....	61



## Lista de Siglas

<b>R</b>	<b>Confiabilidade</b> Reliability
<b>A</b>	<b>Disponibilidade</b> Availability
<b>OEE</b>	<b>Eficácia Geral do Equipamento</b> Overall Equipment Effectiveness
<b>FS</b>	<b>Fator de Segurança</b> Factor of Safety
<b>KPI</b>	<b>Indicadores de Desempenho dos Equipamentos</b> Key Performance Indicators
<b>CBM</b>	<b>Manutenção baseada em Condições</b> Condition-Based Maintenance
<b>TBM</b>	<b>Manutenção baseada no Tempo</b> Time-Based Maintenance
<b>RCM</b>	<b>Manutenção centrada na Confiabilidade</b> Reliability Centered Maintenance
<b>CM</b>	<b>Manutenção Corretiva</b> Corrective Maintenance

<b>BdM</b>	<b>Manutenção de Avarias</b> Breakdown Maintenance
<b>PdM</b>	<b>Manutenção Preditiva</b> Predictive Maintenance
<b>PM</b>	<b>Manutenção Preventiva</b> Preventiva Maintenance
<b>TPM</b>	<b>Manutenção Produtiva Total</b> Total Productive Maintenance
<b>RM</b>	<b>Manutenção Reativa</b> Reactive Maintenance
<b>RTF</b>	<b>Run-to-Failure</b>
<b>MDS</b>	<b>Sistema de Decisão para Manutenção</b> Maintenance Decision System
<b>CMMS</b>	<b>Sistema de Gestão de Manutenção Informatizada</b> Computerised Maintenance Management System
<b>FR</b>	<b>Taxa de Avaria</b> Failure Rate
<b>MTBF</b>	<b>Tempo Médio entre Avarias</b> Mean Time Between Failure
<b>MTBM</b>	<b>Tempo Médio entre Manutenções</b> Mean Time Between Maintenance
<b>MDT</b>	<b>Tempo Médio de Inatividade</b> Mean Downtime
<b>MAMT</b>	<b>Tempo Médio de Manutenção Ativa</b> Mean Active Maintenance Time
<b>MTTR</b>	<b>Tempo Médio de Reparação</b> Mean Time To Repair



# Introdução

## 1.1 Contexto e Motivação

Desde o tempo da revolução industrial que existe necessidade de manter os equipamentos a funcionar permanentemente, em perfeitas condições de laboração.

Uma falha num equipamento pode provocar constrangimentos, mais ou menos graves e, e provocar danos colaterais significativos. É, por isso, essencial prevenir que estas situações ocorram, assegurando que os equipamentos se mantêm ativos nas melhores condições de produtividade e segurança, por forma a evitar danos mais graves e paragens demoradas na produção.

Ao longo dos tempos tem vindo a aumentar a necessidade e a dependência de equipamentos que se tornaram indispensáveis, pelo que, se torna essencial implementar procedimentos para manter a sua maior durabilidade, produtividade e segurança. A manutenção das máquinas deve, por isso, ser abordada com especial atenção para garantir que estas se mantêm em plena atividade durante a sua vida útil. Assim, foram criadas estratégias de manutenção com o grande objetivo de prevenir e estar preparado para eventuais problemas que possam ocorrer e superá-los rapidamente.

Cada vez mais o mundo que nos rodeia transborda de tecnologia e já não conseguimos sobreviver sem ela. Para um engenheiro o principal desafio nesta área é criar uma ferramenta que o auxilie na elaboração do plano ótimo de manutenção da máquina, reduzindo custos e recursos, assegurando o seu funcionamento ininterrupto nas melhores condições.

## **1.2 Objetivos e Abordagem**

Este projeto tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão na indústria. Para o efeito são consideradas várias estratégias, metodologias e filosofias de manutenção essenciais.

Neste trabalho são apresentados também vários indicadores que permitem medir a produtividade e a eficiência de uma máquina e que ajudam a definir a melhor estratégia de manutenção com base na análise dos mesmos.

Um outro aspeto também importante evidenciado neste documento é a capacidade de uma máquina poder ser dividida em subsistemas, cada um deles composto por um conjunto de unidades que interagem entre si, o que permite identificar, de uma forma mais aproximada, a origem de qualquer mau funcionamento.

Para ensaiar a ferramenta desenvolvida é necessária a criação de um simulador.

Este trabalho visa, assim, propor estratégias para assegurar o bom funcionamento de uma máquina, tendo como base a diminuição de custos, a previsão de falhas ou avarias e para que, caso estas ocorram, o tempo de inatividade seja mínimo.

## **1.3 Contribuições**

Para o desenvolvimento de uma proposta de solução foi realizada pesquisa bibliográfica que engloba diversos tópicos no âmbito da manutenção. Foram descritas e explicadas várias Estratégias de Manutenção assim como os Indicadores de Desempenho.

Este projeto destina-se à criação de uma ferramenta que poderá ser inserida na indústria para gerir o tempo de vida útil de uma máquina, otimizando os custos de manutenção.

Para se poder observar o funcionamento do algoritmo foi criado uma interface gráfica em java que permite observar ao longo do tempo o funcionamento da ferramenta e ainda fazer testes unitários para simular o funcionamento de uma série de equipamentos.

## **1.4 Estrutura do Documento**

Esta dissertação foi dividida em oito capítulos distintos: Introdução, Estado de Arte, Abordagem, Desenvolvimento, Resultados, Considerações, Bibliografia e Apêndices.

Na Introdução, são apresentados os objetivos e a abordagem, assim como uma pequena parte introdutória ao tema e quais os contributos para o mesmo.

## Capítulo: Introdução

---

O Estado de Arte contém uma série de conceitos e definições que permitiram adquirir conhecimentos sobre as áreas envolvidas e então definir um plano de trabalho.

Na Abordagem, é especificada qual a proposta de solução para o problema tendo em conta o cenário de estudo e todo o estudo bibliográfico realizado.

No capítulo do Desenvolvimento, é detalhado o trabalho prático realizado assim como os algoritmos implementados.

Os Resultados contêm a representação gráfica dos dados obtidos através dos testes feitos no simulador e as observações aos mesmos.

As Considerações Finais incluem as conclusões e propostas de trabalhos futuros no mesmo âmbito do projeto.

Na Bibliografia estão referidas as referências dos documentos consultados para procura da informação escrita no Estado de Arte.

O Apêndice, destina-se à explicação mais pormenorizada sobre o funcionamento do Simulador e da Ferramenta de Apoio à Decisão.





## Estado de Arte

Manutenção pode ser definida como: a ação de manter ou conservar.

Para uma melhor avaliação e controlo das unidades de produção nas fábricas são utilizados Indicadores de Desempenho dos Equipamentos (Key Performance Indicators – KPI). Estes parâmetros apresentam uma estimativa, relativamente à máquina, sobre a qualidade da manutenção, reparação, estado de funcionamento, entre outros [1].

Os KPI são importantes para aferir sobre a capacidade de funcionamento do equipamento e ajudam na decisão acerca da melhor estratégia de manutenção a adotar.

As estratégias de manutenção são divididas em três classes, onde cada uma das classes tem metodologias de manutenção distintas, [2] e [3]:

- Reativas;
- Proativas;
- Agressivas.

Para a correta avaliação de um equipamento, normalmente, divide-se este em subsistemas. Os constituintes da máquina têm uma função concordante com o agrupamento onde se encontram, ou seja, se o trabalho realizado pelo instrumento interage com um outro devem estar ambos no mesmo subsistema.

Na indústria já são utilizados métodos informatizados de aglomerar e inferir sobre toda a informação já existente sobre manutenção e dados específicos dos equipamentos.

## 2.1 Indicadores de Desempenho dos Equipamentos

Existem 3 tipos de indicadores de desempenho para avaliar o equipamento:

- *Key Results Indicators*;
- *Performance Indicators*;
- *Key Performance Indicators*.

*Key Results Indicators* são dados resultantes dos acontecimentos passados do equipamento. *Performance Indicators*, refere-se a resultados em tempo real das ações presentes. *Key Performance Indicators*, considera uma estimativa do que poderá acontecer com base em acontecimentos passados e presentes [4].

Para o desenvolvimento do trabalho interessa conhecer os *Key Performance Indicators* (KPI) para a avaliação do equipamento, assim esta vertente será mais explorada. Este tipo de Indicadores permitem ter um leque de historiais de equipamentos idênticos e a partir desses dados aferir qual o próximo acontecimento mais provável a nível temporal.

Normalmente o equipamento é subdividido em subsistemas onde os seus constituintes trabalham em comunhão [5]. Por isso os indicadores são calculados para cada subsistema e, só após obter todos os resultados, se pode concluir a confiabilidade da máquina [6], como se pode verificar na equação (2.1).

$$\text{Indicador}_{\text{total}} = \text{Indicador}_1 \times \text{Indicador}_2 \times \dots \times \text{Indicador}_n \quad (2.1)$$

### 2.1.1. Tempo Médio de Reparação

Tal como o nome indica, Tempo Médio de Reparação (*Mean Time To Repair - MTTR*), refere-se ao resultado calculado para tempo médio de que o equipamento necessita para ser reparado, podendo tratar-se de uma substituição ou reparação de algum dos constituintes [7].

O intervalo de tempo tem início no momento em que a unidade fica inativa e termina quando esta volta a funcionar, ou seja, o período em que a máquina fica fora de serviço.

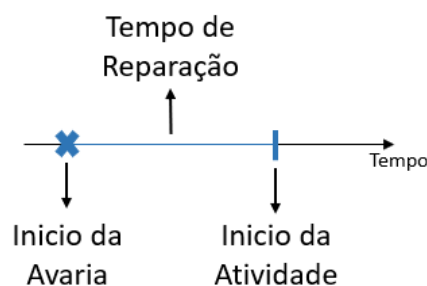


Figura 2.1 - Linha temporal com especificação do tempo de reparação.

Este resultado tem em consideração todas as etapas que uma falha requer até ser resolvida: tempo de notificação, diagnóstico, reparação, espera, montagem, calibração, teste, entre outros. Assim sendo, a expressão tem em consideração uma média do tempo de reparação utilizado nas máquinas, como está representado na equação (2.2).

$$MTTR = \frac{\sum \text{Tempo de Reparações}}{\text{Número de Reparações}} \quad (2.2)$$

Esta avaliação é importante para as fábricas terem uma estimativa de quando o equipamento volta a produzir, afetação da *Disponibilidade*. Se a reparação for muito demorada poderá haver problemas nas encomendas dos clientes e, conseqüentemente, prejuízos, má publicidade para a empresa e outros.

### 2.1.2. Tempo Médio entre Avarias

Este indicador mede o intervalo de Tempo Médio entre Avarias (*Mean Time Between Failure - MTBF*). Mais concretamente tem como resultado uma estimativa onde é calculada a média de funcionamento do sistema ou de algum componente [7].

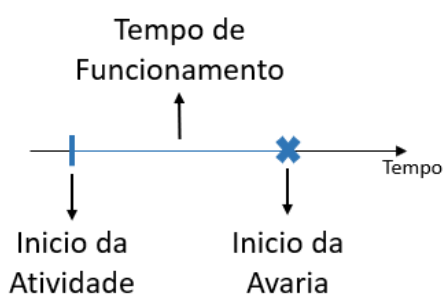


Figura 2.2 - Linha temporal com especificação do tempo de funcionamento.

O MTBF não considera manutenções que sejam realizadas no intervalo. É apenas levado em consideração o equipamento nas condições operacionais normais.

$$MTBF = \frac{\sum(\text{Tempo no início de Atividade} - \text{Tempo no início de Avaria})}{\text{Número de Avarias}} \quad (2.3)$$

O resultado da expressão (2.3) é importante para indicar a *Confiabilidade* do sistema. Uma vez que é obtida uma aproximação do tempo disponível até uma nova avaria, o MBTF é utilizado para prever o desempenho futuro da máquina.

O resultado obtido tem as unidades de tempo utilizadas no numerador da expressão.

### 2.1.3. Tempo Médio entre Manutenções

Tempo Médio entre Manutenções (*Mean Time Between Maintenance - MTBM*), refere-se a uma estimativa do intervalo de tempo utilizado na realização das manutenções [8].

$$MTBM = \frac{\sum(\text{Tempo no início de Atividade} - \text{Tempo no início de Manutenção})}{\text{Número de Manutenções}} \quad (2.4)$$

Este parâmetro medido na equação (2.4) ajuda a medir a necessidade de manutenção do equipamento, o que influencia a afetação de recursos.

#### 2.1.4. Tempo Médio de Manutenção

Tempo Médio de Manutenção (*Mean Active Maintenance Time - MAMT*) é uma estimativa da média do tempo calculada na realização da manutenção [9], está descrita na expressão (2.5).

$$MAMT = \frac{\sum \text{Tempo de Manutenção}}{\text{Número de Manutenções}} \quad (2.5)$$

Este indicador é importante para ter uma estimativa de quanto tempo demora uma manutenção.

#### 2.1.5. Tempo médio de Inatividade

Tempo Médio de Inatividade (*Mean Downtime - MDT*), é o tempo necessário para que o equipamento retorne ao seu funcionamento normal após uma avaria [10].

$$MDT = MAMT + \text{tempo de atraso} \quad (2.6)$$

O tempo de atraso refere-se a logística e administrativo. Este parâmetro é uma estimativa mais aproximada do que o Tempo Médio de Manutenção (MAMT) devido à contabilização do tempo de atraso. A expressão matemática que dá origem a este parâmetro está especificada na equação (2.6).

#### 2.1.6. Taxa de Avaria

Taxa de Avaria (*Failure Rate – FR*), para o cálculo deste indicador é necessário observar o tempo que decorre até surgir uma avaria [11].

Este indicador faz uma estimativa de avarias para um determinado intervalo de tempo [12]

$$FR = \frac{1}{MTBF} \quad (2.7)$$

#### 2.1.7. Disponibilidade

Este indicador dá uma estimativa acerca da percentagem de disponibilidade da máquina num determinado período de tempo.

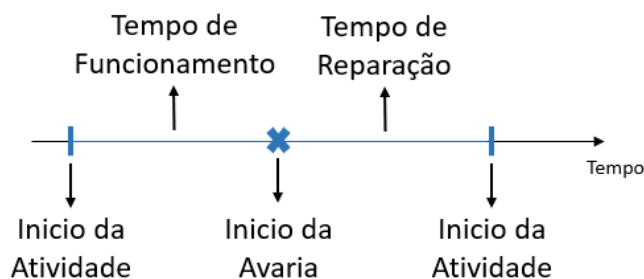


Figura 2.3 - Linha temporal com especificação do tempo de funcionamento e de reparação.

Este cálculo apenas contabiliza avarias, não considera manutenções feitas com base em medidas preventivas [13]. Assim sendo, o cálculo da disponibilidade de uma forma geral pode ser dado pela equação (2.8).

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\sum \text{Tempo de Funcionamento}}{\sum (\text{Tempo de Funcionamento} + \sum \text{Tempo de Reparação})} \quad (2.8)$$

Podem ser utilizadas outras expressões para o cálculo da *Disponibilidade* [8], mais concretamente utilizando outros indicadores que já tenham sido calculados, facilitando assim a contabilização dos parâmetros de tempo.

Denominado Disponibilidade Inerente (*Inherent Availability*) utiliza indicadores já descritos, Tempo Médio entre Avarias (Mean Time Between Failure - MTBF) Tempo Médio de Reparação (Mean Time To Repair - MTTR), como se pode observar na equação (2.9). Estes descrevem uma estimativa da média do tempo de funcionamento e de reparação. No entanto, continua a não ser considerado o tempo utilizado para medidas preventivas, durante o qual a máquina tem de estar inativa, originando atrasos na produção.

$$\text{Disponibilidade}_{\text{Inerente}} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (2.9)$$

Uma outra forma de calcular a disponibilidade está descrita na expressão (2.10), designa-se por Disponibilidade Alcançada (*Achieved Availability*) e baseia-se no Tempo Médio entre Manutenções (Mean Time Between Maintenance - MTBM) e no Tempo Médio de Manutenção Ativa (*Mean Active Maintenance Time* - MAMT). Este método já considera o tempo despendido para medidas preventivas e corretivas, mas continua sem ter em conta os atrasos na matéria-prima e problemas administrativos que possam ocorrer.

$$\text{Disponibilidade}_{\text{Alcançada}} = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \text{MAMT}} \quad (2.10)$$

Por último, a Disponibilidade pode também ser estudada com base no Tempo Médio entre Manutenções (Mean Time Between Maintenance - MTBM) e no Médio de Inatividade (Mean Downtime - MDT), denominando-se Disponibilidade Operacional (*Operational Availability*), a equação (2.11) é definição disso mesmo.

$$\text{Disponibilidade}_{\text{Operational}} = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \text{MDT}} \quad (2.11)$$

Uma vez que este parâmetro se baseia, essencialmente, na ocorrência de falhas, a existência de avarias e falhas contantes tendem a diminuir a Disponibilidade de uma unidade de trabalho.

Numa fábrica é necessário obter uma estimativa de qual será o tempo de funcionamento do equipamento, ou seja, quanto tempo é que ele estará disponível para operar. Este critério é fundamental para gerir a linha de produção e prever qual a capacidade de produção.

### 2.1.8. Custo Operacional do Tempo de Inatividade

Este indicador é útil para calcular o custo que pode ter a inatividade de um equipamento[12].

Para determinar o resultado deste indicador é importante ter em atenção o resultado da Disponibilidade do equipamento para saber quanto tempo de produção não será utilizado para o fabrico de produtos. Na equação (2.12) está descrito o cálculo do tempo de inatividade com base no tempo de produção total e na disponibilidade.

$$\sum \text{Tempo de Inatividade} = \sum \text{Tempo de produção} \times (1 - \text{Disponibilidade}) \quad (2.12)$$

Depois deve ter-se em conta a quantidade de produto que é fabricado por hora e o respetivo custo. Assim, temos todos os dados necessários para saber quais os custos que o equipamento deveria conceder no tempo em que está parado, como está expresso na equação (2.13).

$$\text{Custo} = \sum \text{Tempo de Inatividade} \times \frac{\text{Quantidade de fabrico}}{\text{Hora}} \times \frac{\text{Custo de fabrico}}{\text{Hora}} \quad (2.13)$$

O resultado da expressão acima é o custo dos produtos que a máquina poderia ter produzido se estivesse em funcionamento. Ou seja, o valor que a fábrica não lucrou com a inatividade do equipamento.

Este valor é necessário para a gestão da fábrica na contabilização do produto gerado pela máquina.

### 2.1.9. Desempenho

O indicador de Desempenho apresenta uma estimativa do nível de execução do equipamento relativamente ao tempo de processamento, utiliza para o efeito o tempo ideal de processamento de um produto[14]. Na equação (2.14) está descrita a expressão para o Desempenho.

$$\text{Desempenho} = \frac{\sum \text{Produtos Processados} \times \text{Tempo de Processamento Ideal}}{\sum \text{Tempo de Operação}} \quad (2.14)$$

Os valores ideais de Desempenho do produto são aproximados a 1. Isto significa que os produtos resultantes em média estão a ser processados aproximadamente no tempo que deveriam.

Este indicador é essencial para aferir sobre o funcionamento da unidade e estimar a quantidade de produtos a ser fabricada num determinado período.

### 2.1.10. Qualidade

O indicador de Qualidade avalia percentualmente as características dos produtos gerados na fábrica e afere sobre o nível de excelência dos mesmos. São contabilizados todos os produtos que são gerados pelo equipamento e divididos em dois grupos distintos, consoante o nível de qualidade desejado.

Após a primeira passagem dos artigos na linha de produção deve haver um teste de controlo de qualidade onde os produtos são considerados defeituosos se não atingirem os níveis de mínimos de qualificação, definidos na fábrica. Caso tenham as características necessárias para transcender esses níveis, são considerados de boa qualidade [15].

O indicador Qualidade é calculado através da equação (2.15).

$$\text{Qualidade} = \frac{\sum \text{Produtos Processados} - \sum \text{Produtos com Defeito}}{\sum \text{Produtos Processados}} \quad (2.15)$$

O baixo resultado deste fator pode ter origem numa falta de afinação da máquina ou até algum mal funcionamento que possa originar uma rotura [16]. Este indicador deve ser alto, porque, caso contrário, pode indicar desperdício de matéria-prima e tempo de trabalho sem utilidade da máquina.

### 2.1.11. Risco

O conceito de risco neste caso pode ter vários efeitos. Pode ser o risco para a máquina, para os seres humanos, para o ambiente, para a fábrica, entre outros [9]. Este parâmetro faz uma estimativa de qual o risco que o equipamento tem com base no seu funcionamento, tal como se pode observar na equação (2.16).

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência} \quad (2.16)$$

Este indicador mede as anomalias que o aparelho pode sofrer assim como a probabilidade de ocorrerem.

### 2.1.12. Fator de Segurança

Fator de Segurança (*Factor of Safety* – FS), este valor mede a capacidade de carga de trabalho do equipamento [17]. Na Equação (2.17) encontra-se a equação que descreve o Fator de Segurança.

$$FS = \frac{\text{Carga Máxima Suportada}}{\text{Carga de Trabalho Normal}} \quad (2.17)$$

O resultado da expressão acima indicada deve ser superior a 1 para estar dentro das condições de segurança da unidade e não a danificar.

É importante para avaliar a capacidade de funcionamento que a máquina tem capacidade de aguentar.

### 2.1.13. Confiabilidade

A Confiabilidade mede a segurança e estabilidade que um equipamento deve ter relativamente ao seu funcionamento. Determina a probabilidade de um equipamento não falhar num determinado tempo [12]. Ou seja, refere a probabilidade de um sistema concluir as suas funções num determinado tempo quando utilizado a equação (2.18) para o efeito [18].

$$\text{Confiabilidade} = e^{-\text{Failure Rate} \times \text{tempo}} \quad (2.18)$$

Esta expressão baseia-se no número de Neper e tende para zero ao longo do tempo.

Na Figura 2.4 é apresentado apenas um exemplo da curva quando é considerando o Failure Rate igual a um.

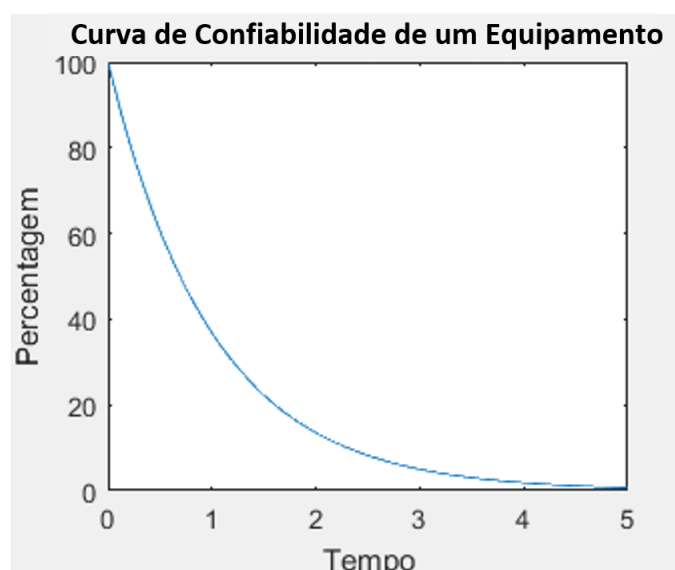


Figura 2.4 - Curva de Confiabilidade do equipamento.

O resultado é obtido em percentagem e é muito relevante para a gestão da fábrica e estimativa do tempo disponível para a utilização dos equipamentos.

### **2.1.14. Eficácia Geral do Equipamento**

A Eficácia Geral do Equipamento (Overall Equipment Effectiveness – OEE) apresenta o resultado do desempenho total da máquina. O OEE considera o tempo em que a máquina não sofre avarias (Disponibilidade) a capacidade de produção do equipamento (Desempenho) e a quantidade de produtos que são fabricados sem defeito (Qualidade) [16]. O OEE pode ser calculado através da equação (2.19).

$$OEE = Availability \times Desempenho \times Qualidade \quad (2.19)$$

Este indicador é obtido em percentagem e é essencial que o resultado seja elevado, caso contrário, implica que o equipamento pode estar com problemas.

Esta medida é bastante relevante para a verificação da produtividade dos equipamentos porque tem em consideração várias grandezas onde cada uma tem a sua função específica. Isto permite que este indicador tenha uma interpretação ampla do desempenho da atividade da máquina [19].

Contudo, o OEE não tem em consideração as paragens planeadas devido a medidas preventivas.

## **2.2 Estratégias de Manutenção Reativas**

Estratégias de manutenção reativas são linhas de ação que se baseiam na resolução de anomalias só depois de elas ocorrerem, não havendo manutenção preventiva para evitar anomalias [20].

Na Figura 2.5 são apresentados os tipos de resposta que podem ocorrer se a Estratégia for Reativa e sempre que um equipamento deixar de funcionar corretamente [2].



Figura 2.5 - Conjunto de estratégias Reativas.

Os métodos de manutenção constituintes desta estratégia são: Manutenção Reativa, *Run-to-Failure*, Manutenção de Avarias e Manutenção Corretiva. As primeiras três são consideradas idênticas por vários autores [7], [24], [25],[26].

### **2.2.1. Manutenção de Avarias**

Manutenção de Avarias (*Breakdown Maintenance - BdM*) consiste em restaurar o equipamento após ocorrer uma avaria no sistema que impede o seu bom funcionamento, um *breakdown*, tal como o nome indica [7].

A BdM pode ser dividida em manutenção planeada ou não planeada [21]. A manutenção planeada, denomina-se *Run-To-Failure (RTF)*. A outra designa-se Manutenção Reativa (*Reactive Maintenance – RM*).

Na primeira, existe um plano que é acionado após ocorrer uma avaria. Isto tanto pode ser a substituição da máquina por outra, como a existência de peças suplentes para a substituição dos instrumentos danificados [22].

A RM é um método em que não existe um plano de manutenções regulares para tentar evitar que uma máquina avarie inesperadamente [23].

No entanto existem autores que não dividem esta estratégia [7], [24], [25],[26]. Segundo estes autores, estas três estratégias têm exatamente a mesma utilidade e definição. Assim, a esta metodologia pode associar-se qualquer um dos três nomes acima referidos.

A estratégia reativa é considerada uma metodologia que não exige manutenção uma vez que a intervenção na máquina só ocorre após avaria, sendo na verdade uma reparação. Ou seja, implica que a máquina enquanto trabalha não deve sofrer qualquer tipo de manutenção para

além da básica, tal como, limpeza ou lubrificação se necessário. O objetivo é a reparação após falhar, sem grandes custos aplicados na sua manutenção.

Quando o funcionamento normal do equipamento é posto em causa devido à ocorrência de uma falha é necessário identificar o problema de forma a poder corrigi-lo. Isto pode ser feito com auxílio a *software* especializado.

Para um sistema que apenas utilize este tipo de abordagem a grande vantagem é não existir exatamente um plano de ação para uma máquina em bom funcionamento, ou seja, enquanto o equipamento estiver a funcionar corretamente não é necessário nenhum conserto técnico [27]. Isto leva a que não existam custos de manutenção. No entanto, este sistema é muito pouco prático no momento em que ocorre uma avaria, em princípio inesperada. A falta de plano para a reparação poderá implicar perda de tempo extra relativa à gestão da mão-de-obra para o conserto da máquina e, após a deteção da falha, ser necessário trocar peças que poderão não estar disponíveis de imediato.

Mais um dos inconvenientes da utilização deste método é o risco de redução da qualidade do produto uma vez que poderá haver deterioração durante funcionamento da máquina e danificar o produto.

Os custos relativos à reparação da máquina podem ser muito dispendiosos, porque, por exemplo, se for uma máquina industrial pode pôr em causa os níveis de produção necessários e também se a falha num constituinte do equipamento tiver degradado outros que estavam em bom estado de funcionamento.

Concluindo, uma falha numa máquina pode originar paragem de toda a produção o que implicará atrasos nas entregas aos clientes, logo mais despesas para a fábrica. Uma vez que não se pode prever o tipo de falha que vai ocorrer, é importante ter em conta danos mais sérios que poderão vir a surgir após uma avaria [28].

Este tipo de manutenção apenas deve ser aplicado quando os custos de reparação forem inferiores aos custos de manutenção preventiva.

### **2.2.2. Manutenção Corretiva**

Manutenção Corretiva (*Corrective Maintenance* – CM), ao contrário dos anteriores, é realizada como forma de prevenção para evitar a avaria técnica do equipamento. São realizadas atividades para detetar, isolar e corrigir uma falha, um erro ou até uma avaria no equipamento para que este volte a cumprir as suas funções convenientemente [29].

Esta estratégia pode ser utilizada para reparar as avarias, mas também poderá ser bastante útil para corrigir anomalias a partir de outras técnicas de manutenção mais elaboradas [30].

A alteração detetada é estudada por técnicos especializados e, se necessário, é definido um plano para alterar as peças em risco de avaria ou de mau funcionamento.

Consoante as anomalias encontradas, o plano é definido com base na probabilidade de ocorrer uma avaria num determinado instrumento e o respetivo impacto [31].

Desta forma são realizadas reparações na máquina de forma planeada e com intuito de evitar uma avaria e aumentar a *Disponibilidade* do equipamento [32].

Este método é muito vantajoso para a gestão dos equipamentos. A elaboração de um plano é extremamente útil nas máquinas que exijam funcionamento constante, para efeito de estimativa de custos. É necessário contrabalançar o tempo de reparação com os custos que isso poderá implicar.

O facto de o tempo de manutenção ser muito elevado, poderá implicar o congestionamento de uma linha de montagem. Assim sendo, originar-se-á uma falta de produção que poderá posteriormente levar à falta de produtos para entrega aos clientes. Tudo deve ser medido convenientemente para evitar constrangimentos tanto ao nível de produção, como ao nível de bom funcionamento das máquinas e da fábrica.

A qualidade dos produtos também pode reduzir em consequência de as máquinas se degradarem mais depressa sem uma manutenção preventiva eficaz [33].

## **2.3 Estratégias de Manutenção Proativas**

As estratégias de Manutenção Proativas são caracterizadas por antecipar as anomalias antes de ocorrerem. Assim, podem ser acionadas atividades que evitem problemas com maior gravidade [34].

Estas estratégias contêm várias técnicas específicas e, o que têm em comum é o objetivo para o qual são utilizadas, ou seja, evitar falhas nos equipamentos melhorando consequentemente o tempo de vida destes e melhorar a qualidade de produção [2].

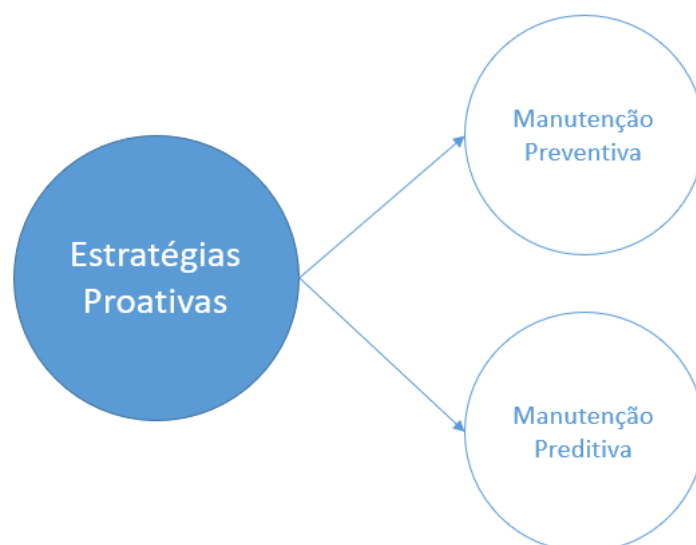


Figura 2.6 - Conjunto de estratégias proativas.

A estratégia de manutenção proativa pode ser dividida em dois tipos distintos: Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva.

### **2.3.1. Manutenção Preventiva**

Para evitar avarias ou a necessidade de reparar máquinas pode ser utilizada esta estratégia para verificação do seu estado e conseqüente aumento do tempo de vida.

A abordagem deste modo de manutenção pode ser adotada através de distintos métodos. A forma como pode ser aplicada esta estratégia poderá surgir da forma mais básica, tal como, a limpeza da máquina ou lubrificação e algumas técnicas mais complexas como inspeções [7].

Para a Manutenção Preventiva (*Preventive Maintenance – PM*) é importante desenvolver um plano aplicado ao equipamento em questão para fazer revisões frequentes.

As revisões tanto podem ser periódicas como sequenciais. Na primeira existem manutenções que são efetuadas em intervalos de tempo fixos. E nas sequencias são realizadas com base numa expressão calculada com base na necessidade do equipamento [35].

Este plano deve conter inspeções constantes e agendadas de forma a controlar o funcionamento da máquina e, ao mesmo tempo, não interferir com o trabalho na fábrica. É importante também ter em conta os custos agregados para estruturar o plano o mais rentável possível [36].

As inspeções realizadas implicam a obtenção de dados que ditam a eficácia do equipamento em condições laborais. Estes são utilizados também para cálculos de custos de operação, entre outros.

É importante ter em consideração que, embora as técnicas utilizadas neste método façam com que a máquina seja mais duradora, isto não implica que não possa ocorrer uma avaria.

Assim, consoante as informações retiradas sobre o estado da máquina, pode ser previsível qual o sítio mais provável para ocorrer uma quebra. Deste modo, pode ser implementado um plano com base na necessidade.

A PM pode ser dividida em dois procedimentos distintos. O primeiro onde é avaliado o equipamento e realizada a substituição e reparação de peças, quando necessário. E a segunda refere-se a ações que a máquina precisa para trabalhar corretamente como calibrações, ajustes, lubrificações, entre outras [37].

O primeiro procedimento, no que toca a substituição e reparação de peças, pode assemelhar-se à Manutenção Corretiva (*Corrective Maintenance* – CM). A diferença é que na PM a troca é realizada antes de haver um problema, tal como uma avaria ou uma anomalia no funcionamento da máquina. Relativamente à CM, as ações de substituição ou reparação são efetuadas após a identificação de alguma anomalia na unidade [38].

A PM é bastante utilizada essencialmente para detetar, corrigir e evitar condições que sejam favoráveis a alguma anomalia no funcionamento do equipamento, paragem de produção e até desgaste prematuro dos instrumentos.

### **2.3.2. Manutenção Preditiva**

Este método consiste em identificar e prever alterações de funcionamento que indiquem que o equipamento está próximo de uma avaria.

A implementação da Manutenção Preditiva (*Predictive Maintenance* – PdM) implica a monitorização da máquina através de sensores [39]. Os dados retirados são utilizados para previsão do desgaste das peças e servem para o cálculo de indicadores que medem a eficiência do equipamento.

A medição dos indicadores é a melhor forma de calcular o desgaste e a produtividade da máquina ao longo do tempo. Como forma de comparação são utilizados dados anteriores. Assim, se houver valores muito baixos ou, se estiverem a descer drasticamente, é sinal de que inspeções devem ser realizadas com mais regularidade [40].

Em geral, para este tipo de manutenção prevalece essencialmente a valorização dos seguintes pontos [7]:

- Monitorização da vibração – A técnica mais utilizada para a alterações do equipamento;
- Termografia – Identifica anomalias térmicas;
- Tribologia – Analisa a lubrificação e o desgaste dos materiais;
- Parâmetros dos Processos – Considerados os indicadores da eficiência do equipamento;

- Análise do Motor Elétrico – A vibração da máquina pode ser influenciada pelo motor ou até existir mau funcionamento por parte deste que não seja detetado pelo sistema de monitorização da vibração. Assim é importante uma análise cuidada para este instrumento.
- Inspeções visuais – A monitorização pode não ser suficiente para detetar todas as falhas, assim são importantes inspeções periódicas para confirmar o correto funcionamento da máquina.
- Monitorização Ultrassónica – É uma das técnicas mais utilizadas. Esta utiliza métodos para identificar altas frequências. Normalmente utilizada em fluídos, mas tendo outros propósitos.
- Outras técnicas – Consoante o tipo de da máquina deve ser estudada qual a melhor abordagem, posteriormente deverá ser toma a decisão relativa aos processos a serem aplicados.

Esta técnica pode evitar os custos relativos a Manutenção Reativa, uma avaria não planeada, e a PM em excesso, manutenções e inspeções de instrumentos sem necessidade.

Na realidade ao utilizar este método de manutenção o equipamento ficará monitorizado diariamente. O que significa que ao verificar alguma anomalia podem ser aplicados processos mais específicos de forma a identificar o objeto ou o foco onde é necessária alguma reparação ou mesmo substituição.

Por exemplo, se ocorrer uma anomalia que seja detetada pela PdM podem ser aplicados métodos da PM de forma a identificar o que está a falhar e de seguida corrigir o que pode causar uma avaria [25].

A grande vantagem da aplicação deste sistema é a capacidade de detetar possíveis avarias a qualquer momento. Isto favorece a produtividade e eficiência da máquina, reduz os custos associados a paragens indevidas do equipamento e diminui ainda o tempo de manutenção, uma vez que há possibilidade de ser programado.

Contudo, a PdM pode ser dispendiosa. Este sistema permanece constantemente ativo, ou seja, a gerar dados que necessitam de ser interpretados. Sendo assim, é compreensível que seja necessário alguém com experiência para conseguir trabalhar com a máquina e interpretar os dados. Também é importante levar em consideração que qualquer sistema necessita de manutenção o que envolve mais custos [41].

## 2.4 Estratégias de Manutenção Agressivas

As Estratégias de Manutenção Agressivas envolvem vários tipos de manutenção tanto reativas como proativas para ter os melhores benefícios dos equipamentos [2].

As estratégias de manutenção agressivas são consideradas metodologias que agrupam um conjunto de tarefas e teorias sobre a melhor abordagem. Normalmente com base em certos Indicadores de Desempenho (*Key Performance Indicators – KPIs*) determina-se qual a melhor metodologia a aplicar de Manutenção Preventiva (*Preventive Maintenance – PM*), uma vez que estas são destinadas para melhorar o desempenho dos equipamentos.



Figura 2.7 - Conjunto de estratégias agressivas.

As Manutenções estudadas estão representadas na Figura 2.7 e são: Manutenção baseada no Tempo, Manutenção baseada em Condições, Manutenção baseada no Risco, Manutenção centrada na Confiabilidade, Manutenção de Produtividade Total.

Tabela 2.1 - Estratégias proativas utilizadas em cada metodologia.

Filosofias	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva
Manutenção baseada no Tempo	X	
Manutenção baseada em Condições	X	X
Manutenção centrada na Confiabilidade	X	X
Manutenção de Produtividade Total	X	X
Manutenção baseada no Risco	X	X

Quanto à utilização da PM, como se pode verificar na Tabela 2.1, todas as metodologias têm o objetivo de planejar o melhor possível quando efetuar as manutenções planeadas.

Em geral, as ideologias que utilizam a PdM fazem-no devido à dependência que têm dos KPIs ou para a criação de um modelo matemático de apoio à decisão, por isso nem todos os tipos de Manutenção deste âmbito têm a necessidade de utilizar PdM.

### **2.4.1. Manutenção baseada no Tempo**

Esta técnica, também conhecida como Manutenção Periódica (*Periodic Maintenance*), consiste em estimar uma avaria ou uma falha com base no ciclo de vida do equipamento. A partir desta análise é determinada qual a melhor estratégia a aplicar para aumentar o tempo de vida da unidade [42].

Para a utilização da Manutenção baseada no Tempo (*Time-Based Maintenance – TBM*) é necessário um estudo prévio de unidades o mais idênticas possível, ou seja, do mesmo fornecedor, modelo e utilidade. Isto é necessário para a elaboração da curva referente ao ciclo de vida. Esta é prevista com base nos conhecimentos adquiridos e por isso são apenas probabilidades e estatísticas, não expõe o comportamento real do instrumento.

Esta curva tipicamente é dividida em três partes: tempo inicial, tempo útil e tempo final. O tempo inicial diz respeito à primeira fase da vida do equipamento em que a probabilidade de ocorrer uma falha (de fabrico) tem tendência a diminuir ao longo do tempo; uma segunda fase, o tempo útil, para o qual as estatísticas apontam para a estabilidade da curva com reduzidas hipóteses de surgir alguma avaria; por último, o tempo final na qual a possibilidade de suceder um problema é mais elevada.

Um exemplo da aplicação desta ferramenta é a manutenção realizada a um automóvel. Numa fase inicial podem surgir problemas elétricos ou qualquer outra deficiência rapidamente detetada; seguidamente ganha-se confiança no carro e, mais tarde começam a surgir problemas de travões, ignição, etc.

Na Figura 2.8 pode ser observada um exemplo de uma curva a descrever a probabilidade de avaria do equipamento.

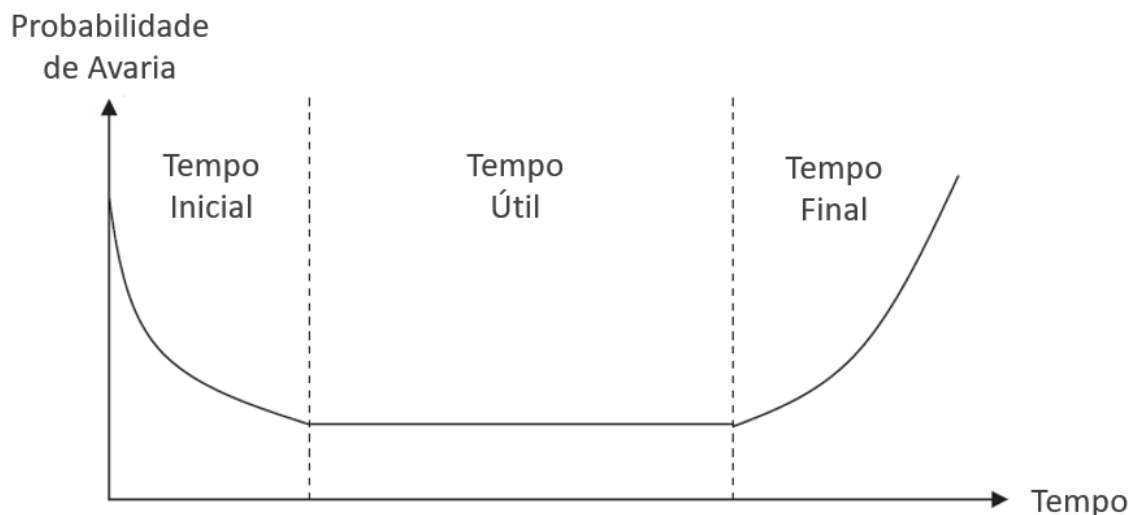


Figura 2.8 - Ciclo de vida de um equipamento.

Não existe nenhum método padrão de como aplicar este tipo de estratégia. Por isso, tanto pode existir necessidade de reparação ou substituição de peças, após ocorrer uma falha, através de controlo por níveis mínimos de qualidade no fabrico do produto, ou confiabilidade da máquina. A decisão de aperfeiçoamento, tal como restauro ou reposição de constituintes, é condicionada pela análise do tempo de vida do equipamento e pela minimização de custos.

A estratégia é proveitosa para a elaboração de um plano regular de manutenções específicas onde é inserida a PM, que conforme a necessidade e a probabilidade de avaria de acordo ciclo de vida do equipamento [24].

Esta metodologia pode ser útil para reduzir os custos relativos a inspeções desnecessárias, mas também contribui para ocorrer uma avaria imprevisível, uma vez que é feito em determinados intervalos de tempo e um problema pode ocorrer entre inspeções [24].

Um exemplo da aplicação desta ferramenta é a manutenção realizada a um ar condicionado. Este deve ser limpo consoante a utilização, ou seja, quanto mais for utilizado mais vezes deverão ser realizadas inspeções ou manutenções. No entanto como este não é o único parâmetro a ter em consideração também é necessário ter em conta a fase da vida onde o equipamento se encontra [43].

#### 2.4.2. Manutenção baseada em Condições

A estratégia em questão por vezes é confundida com a PdM ou uma junção das técnicas PM e PdM sendo por isso considerada uma metodologia de trabalho. É uma forma de manutenção bastante utilizada por ser tão completa e eficiente.

Manutenção baseada em Condições (*Condition-based Maintenance* – CBM) aplica os métodos praticados pelo a Manutenção Preventiva (PM) e Preditiva (PdM), contudo a decisão relativa a seguir o plano predefinido é realizada com base em determinadas condições.

O grande objetivo da aplicação deste sistema é minimizar os custos de inspeções e reparações quando não existe necessidade para tal [44].

Assim, numa primeira fase é importante a monitorização da máquina através dos sensores. Com base nos dados obtidos são calculados os indicadores relativos à eficiência do equipamento, tal como é praticado na PdM [24].

As aquisições destes dados são importantes para avaliar o funcionamento do equipamento em tempos futuros. Ou seja, são realizadas previsões que evidenciam o tempo de vida e a correta atividade dos instrumentos [41].

Consoante as alterações dos indicadores comparativamente aos anteriores calculados, é tomada uma decisão de prosseguir, ou não, com o plano predefinido relativo a inspeções.

No caso de serem detetados desvios de funcionamento face ao previsto é realizado uma manutenção mais intensiva para detetar a origem do problema.

Por outro lado, se os indicadores relativos ao desgaste num determinado foco do equipamento derem sinais de estarem em perfeito funcionamento pode ser tomada a decisão de abolir a necessidade de realizar a próxima manutenção planeada.

Não existe uma arquitetura genérica para este tipo de manutenção, pelo que é possível encontrar vários modelos estruturados cada um com a sua metodologia. É comum esta metodologia estar a ser associada um sistema de suporte à decisão [45].

Uma vantagem notável é a capacidade de garantir o controlo e monitorização da máquina de modo a prevenir o desgaste e uma possível avaria [37].

A grande diferença faz-se notar no que se refere aos custos quando deixam de ser realizadas manutenções desnecessárias.

Contudo, para a implementação desta estratégia de manutenção é necessário maior investimento inicial. Por isso, é aconselhável verificar se o custo e a metodologia deste tipo de sistema, é aplicável ao equipamento em estudo.

### **2.4.3. Manutenção centrada na Confiabilidade**

Esta manutenção é mais complexa implicando assim um estudo prévio ao equipamento de forma bastante pormenorizada. O objetivo da implementação deste sistema é, com base no ciclo de vida do objeto, definir qual o melhor tipo de manutenção a realizar.

Como base de suporte para definir o plano de manutenção é necessário conhecer quais as possíveis falhas assim como o próprio custo, a probabilidade de ocorrer e mais alguns detalhes, tais como causas prováveis. Estes dados são importantes para a estimativa do ciclo de vida do equipamento [6].

Principais questões que devem ser colocadas para averiguar quanto às avarias são: [46]:

- Como é que a avaria pode ocorrer?
- Quais são as consequências agregadas?
- O que pode melhorar com a PM?

Após delineada a projeção do ciclo de vida do equipamento é possível então definir qual a melhor abordagem a efetuar.

A Manutenção centrada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance – RCM*) utiliza outros métodos de manutenção, tais como os já explicados anteriormente, para evitar falhas ou avarias e melhorar consequentemente a Confiabilidade, a Segurança e reduzir os custos da unidade [47].

Esta estratégia tem em conta os custos relativos a cada tipo de manutenção consoante o ponto no ciclo de vida em que o equipamento se encontra. Assim, consegue determinar-se qual o melhor e menos dispendioso método a utilizar, evitando custos desnecessários.

Esta estratégia é valorizada no mercado pela noção de custos que carrega e pela eficiência que transparece quando é decidida qual a melhor metodologia para utilizar. Também tem um bom desempenho para melhorar os resultados de certos Indicadores de Desempenho e aumentar a duração do equipamento [48].

Porém, é uma estratégia dispendiosa tanto no investimento como durante o processo. É necessária a intervenção de profissionais especializados para garantir o correto funcionamento do aparelho e a implementação da metodologia da forma adequada.

É essencial que os técnicos que operam as máquinas sejam especializados para poderem aferir sobre os dados obtidos a partir do equipamento. Só deste modo é passível alcançar bons resultados e detetar o ponto ótimo para possíveis intervenções e manutenções que sejam necessárias de ser realizadas.

Deste modo, são evitados problemas e custos extra que podem implicar paragens indevidas do equipamento ou diminuição da produtividade e da qualidade dos produtos.

#### **2.4.4. Manutenção Produtiva Total**

Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance – TPM*) funciona como uma filosofia de trabalho. A sua aplicação passa não só por transformações nos equipamentos, mas também por melhorar o ambiente de trabalho para os funcionários.

Inicialmente isto foi criada como uma metodologia de trabalho que evoluiu para uma prática de manutenção. O objetivo principal era o aumento da produtividade e da qualidade do fabrico. Sendo assim, foram realizadas transformações no método de trabalho.

A TPM pode ser dividida em três áreas distintas [49]:

- Eficácia Total;
- Sistemas de Manutenção Total;
- Participação Total.

A primeira refere-se a melhorar os valores dos KPI, mais especificamente o OEE. Isto para garantir o ótimo funcionamento do equipamento em vários aspetos, influenciando essencialmente a produtividade [50].

Nos sistemas de manutenção total é introduzida a parte mais técnica da questão, a manutenção planeada, ou seja, a Manutenção Preventiva (PM).

Na aplicação do TPM são utilizados modelos probabilísticos que determinam qual a melhor altura para a realização de manutenções/inspeções.

Para a realização do modelo matemático é necessária a aquisição de dados a partir da Manutenção Preditiva (PdM) [51].

Por último, a aplicação desta filosofia implica o envolvimento de todos os trabalhadores, sem exceção. Portanto, é necessária uma eficiente e simples gestão dos funcionários de forma a que seja simples cada um entender qual o papel a desempenhar [7].

O foco é incentivar e influenciar os empregados a melhorar as suas capacidades e dar-lhes oportunidade de aprenderem a forma correta e económica de completar as suas tarefas. Assim, eles podem desenvolver os seus afazeres de forma cuidada.

Os empregados aprendem como podem fazer as coisas de forma a não pôr em causa o trabalho dos outros. São mais instruídos e por isso têm oportunidade de melhorar o seu desempenho [52].

Proporcionar boas condições de trabalho aos funcionários é uma forma de motivá-los a elaborar melhor e com mais perfeccionismo as suas tarefas.

Esta forma de incentivar e formar os funcionários implica não só o melhor aproveitamento das suas capacidades para o seu trabalho, mas a nível mais técnico, também pode ser bastante útil [25].

Por exemplo, antes o técnico que trabalha com a máquina apenas se preocupa em gerar produtos. O objetivo é que ele esteja familiarizado com a máquina com que trabalha e detete avarias com mais facilidade.

Esta metodologia baseia-se, essencialmente, na melhoria da produtividade e na eficácia do equipamento utilizando, não só as técnicas de manutenção, mas também a formação dos trabalhadores para o efeito [53].

É de esperar que existam custos associados o que inicialmente poderá ser dispendioso. No entanto, pode haver melhoria de produtividade e de qualidade dos produtos, o que é benéfico para a fábrica.

### **2.4.5. Manutenção baseada no Risco**

Esta metodologia, Manutenção baseada no Risco (*Risk-Based Maintenance – RBM*), defende que as inspeções e manutenções planejadas devem, tal como o nome indica ser realizadas com base na análise do risco. Esta abordagem tem como objetivo diminuir a probabilidade de ocorrência de falhas e avarias nos sistemas assim como as suas consequências [54].

A noção de risco, neste caso, não se aplica apenas a situações que possam pôr em causa a vida dos seres vivos ou o meio ambiente, sendo também considerados, todos os modos de avarias existentes em cada subsistema do equipamento, o investimento feito, entre outros [50].

Relativamente a problemas que possam surgir é avaliada a probabilidade da sua ocorrência e as respetivas consequências. Com base nos resultados desta avaliação, são implementadas estratégias de manutenção planejadas com o objetivo de evitar riscos desnecessários.

Inicialmente, o equipamento deve ser dividido em subsistemas para que os diferentes módulos possam ser estudados de forma independente e conseqüentemente é mais fácil de identificar o módulo com avaria ou defeito.

Após o risco ser calculado deverá ser ponderado o nível de gravidade quanto à afetação do sistema. Caso o risco seja demasiado elevado, o módulo deverá ser corrigido com um plano de manutenção.

Todos os módulos devem ser verificados para garantir que o sistema não corre riscos desnecessários.

Na Figura 2.9 está a descrição da base de um algoritmo de manutenção de risco.

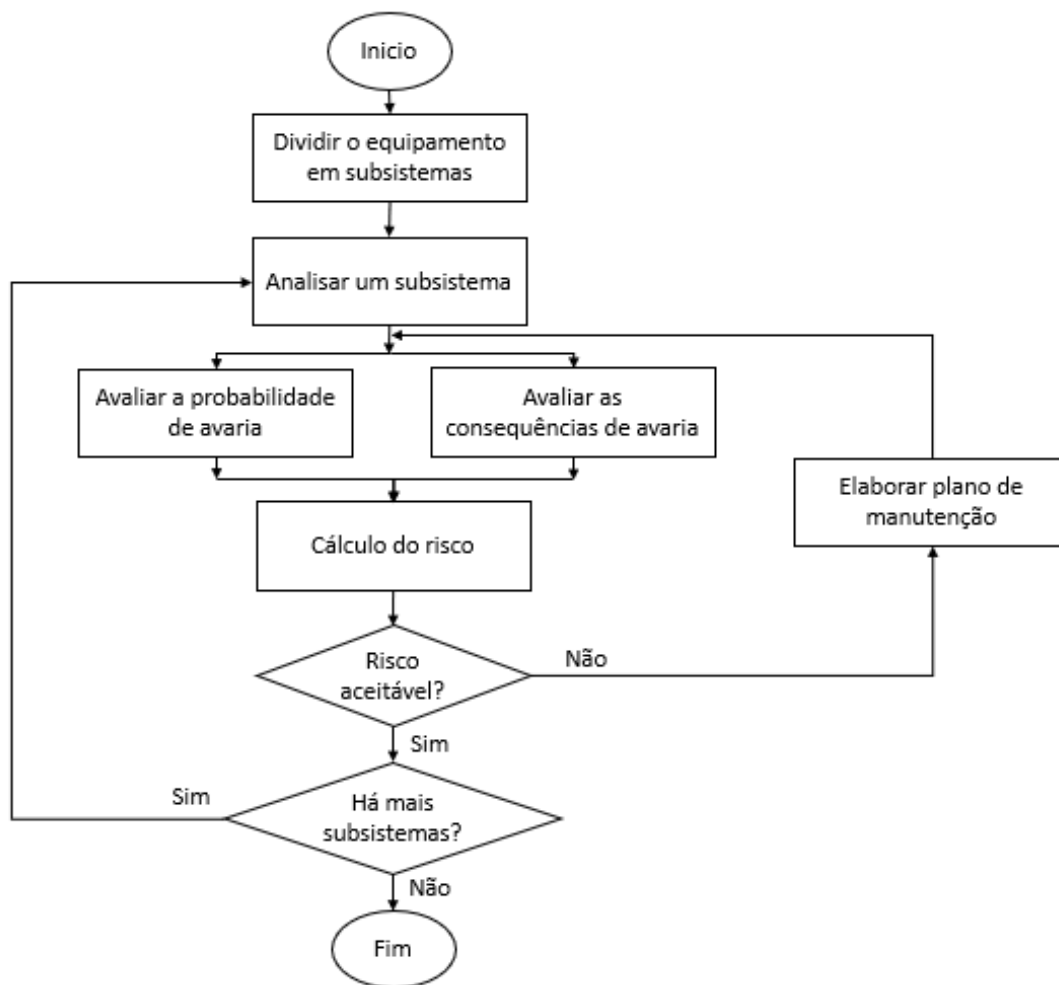


Figura 2.9 - Algoritmo descritivo da RBM.

Esta metodologia pode ser dividida em dois pontos [55]:

- Avaliação do Risco;
- Elaboração do plano de manutenção baseado no risco.

### Avaliação do Risco

Considera-se risco a probabilidade de ocorrer um prejuízo ou uma avaria. Assim sendo, para cada subsistema devem ser colocadas as seguintes questões:

- O que originar uma avaria?
- Como pode originar-se a avaria?
- Qual a probabilidade de ocorrer?
- Quais podem ser as consequências?

O risco pode ser classificado de três formas distintas [56]:

- Qualitativo;
- Quantitativo;
- Semi-quantitativo.

A primeira está essencialmente relacionada com a quantidade de vezes que pode ocorrer e com as respetivas consequências. Esta análise é valorizada se o custo referente à prática de manutenção compensar o valor de resolução do problema. É considerada uma forma rápida de avaliar as consequências e a probabilidade do risco.

A avaliação qualitativa do risco, tal como o nome indica, refere-se à qualificação da avaria. Este tipo de ponderação tem em consideração a probabilidade de ocorrência da mesma e as consequências das respetivas avarias.

Por último, existe a avaliação semi-qualitativa que absorve a capacidade de análise rápida da qualitativa e a precisão da quantitativa. É uma ponderação das primeiras avaliações, englobando mais informação e encontrando um meio termo.

Uma forma de qualificar melhor o risco é a utilização de uma matriz de riscos, por exemplo a espelhada na Figura 2.10, que pode conter mais ou menos detalhe.

		Consequências				
		Insignificante	Pouco Importante	Moderado	Grave	Muito Grave
Probabilidade	Muito Provável	Médio Baixo	Médio	Médio Alto	Alto	Alto
	Provável	Baixo	Médio Baixo	Médio	Médio Alto	Alto
	Possível	Baixo	Médio Baixo	Médio	Médio Alto	Médio Alto
	Improvável	Baixo	Médio Baixo	Médio Baixo	Médio	Médio Alto
	Muito Improvável	Baixo	Baixo	Médio Baixo	Médio	Médio

Figura 2.10 - Matriz para a avaliação do risco.

A matriz apresentada acima é apenas um exemplo, mas a cada campo devem ser atribuídos detalhes específicos que permitam a distinção da gravidade de uma consequência e do grau de probabilidade. Assim, é criada uma planificação da avaliação de riscos característica para um ou mais equipamentos onde, consoante o tipo de risco, é aplicada o melhor tipo de manutenção.

### Elaboração do plano de manutenção baseado no risco

A manutenção deve ser planeada com o propósito de diminuir a probabilidade de avaria e o risco para valores aceitáveis.

Um dos métodos utilizados para o cálculo do intervalo de manutenção nesta estratégia é a *Reverse Fault Tree Analysis* (RFTA). A análise da árvore é realizada de cima para baixo com auxílio da lógica booleana [1]. Na Figura 2.11 pode ser observado um exemplo.

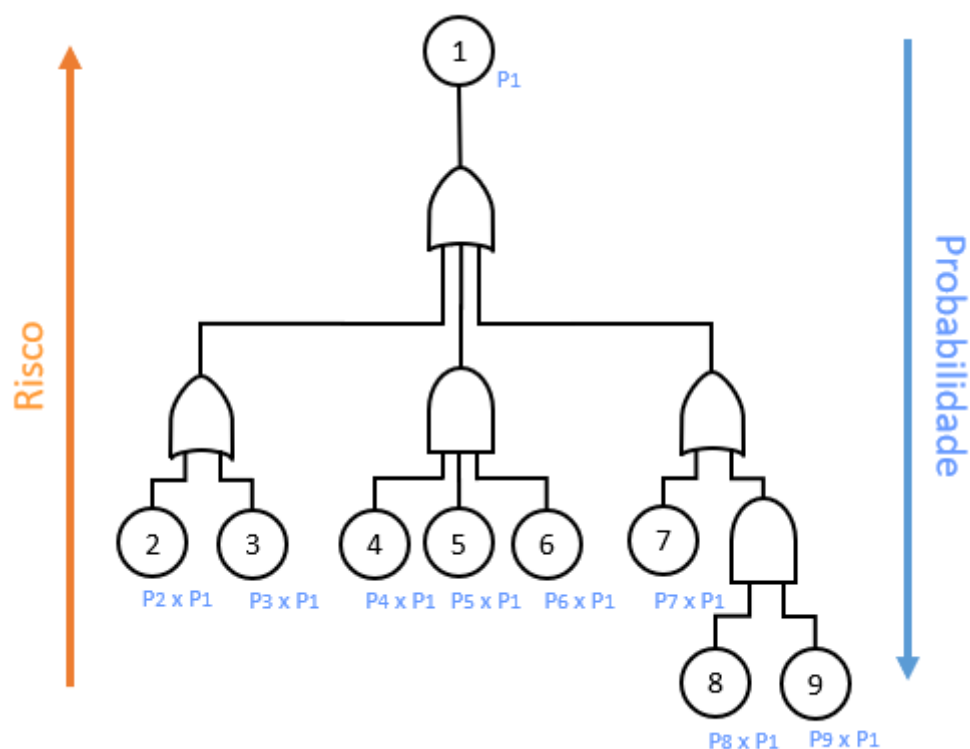


Figura 2.11 – Análise da árvore de falhas reversa.

Nos níveis superiores estão posicionadas as avarias que contêm maior risco e é contabilizada uma determinada probabilidade de necessitar de manutenção. Nos níveis inferiores a probabilidade é influenciada com base nos anteriores.

O cálculo da probabilidade é utilizado para o planeamento da manutenção do equipamento.

## 2.5 Algoritmos

Existe uma variedade de algoritmos que poderiam ser explorados no âmbito do projeto, mas foram estudados dois, o Algoritmo Genético e o Método dos Mínimos Quadrados.

Estes algoritmos auxiliam o funcionamento da ferramenta, tornando-a mais eficiente.

### 2.5.1. Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos são inspirados na evolução e genética biológica, tendo por sua vez um funcionamento paralelo implícito nos termos utilizados. É um sistema artificial adaptativo e por isso é utilizado em processos de otimização [57].

Tal como nos seres-vivos, existe inicialmente um conjunto de cromossomas que pode gerar uma diversidade de outros conjuntos. Isto acontece devido à variedade de cromossomas do conjunto inicial e de mutações e cruzamentos cromossómicos que possam ocorrer durante o processo.

A nível computacional, o primeiro conjunto a ser criado é gerado de forma aleatória e poderá ser representado como uma *string* ou um vetor.

O objetivo do Algoritmo Genético é gerar dados de entrada, para que num determinado processo em estudo, seja possível obter esses dados tendo previamente definido um resultado de saída [58].

Os conjuntos de cromossomas a serem testados, devem ser submetidos a uma função que devolva um determinado resultado e permita posteriormente apurar quais os melhores cromossomas encontrados [59]. Na Figura 2.12, foi criado um exemplo onde uma determinada população foi submetida a uma função, não importa qual, originando uma avaliação final para cada indivíduo.

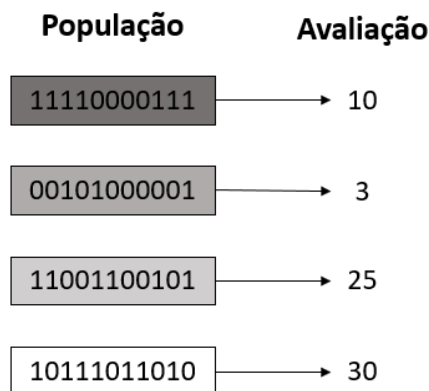


Figura 2.12 - Avaliação da população de cromossomas.

A partir dos resultados as condições impostas sobre a leitura dos mesmo, terá de ser estipulada para que então exista uma seleção dos resultados. O critério de seleção, neste exemplo, será “Os dois resultados mais altos”, assim na Figura 2.13 foram escolhidos os dois indivíduos que cumpram a seleção.

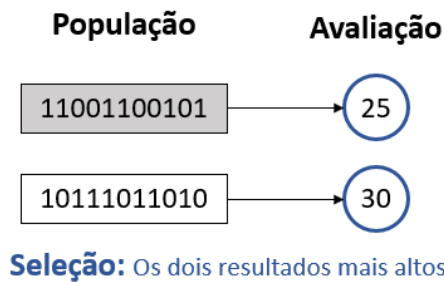


Figura 2.13 - Seleção dos cromossomos a partir da avaliação.

Depois da seleção dos cromossomos deve ser iniciado o processo para geração de novos conjuntos. Durante o processo podem ocorrer fenômenos de cruzamento cromossômico e de mutação.

O cruzamento cromossômico é descrito por um cruzamento efetuado entre cromossomos que os diferencia dos seus “pais”. Nesta troca existem sempre uma herança que se mantém igual ao progenitor, mas também uma modificação que permite criar uma maior diversidade de cromossomos [60].

Na Figura 2.14 está um exemplo do que poderá ser um cruzamento cromossômico a nível computacional, a partir dos indivíduos escolhidos.

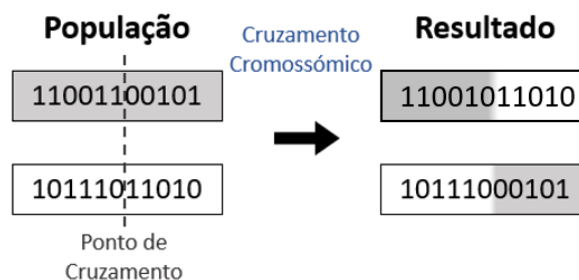


Figura 2.14 - Cruzamento cromossômico a nível computacional.

A mutação existe quando existe uma troca de cromossomos, ou seja, o cromossoma inicial sofre uma alteração aleatória, para que possa existir uma maior procura de população a partir de um pequeno grupo.

Na Figura 2.15 está demonstrado a mutação nos dois indivíduos escolhidos.

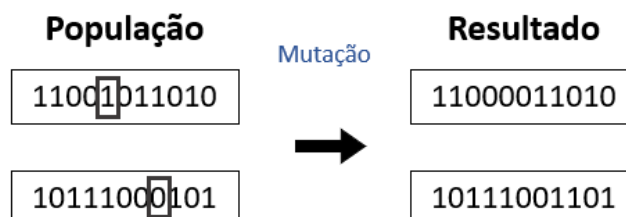


Figura 2.15 - Mutação genética a nível computacional.

Finalmente, é eliminada a população anterior e repete-se todo o processo de seleção para os novos conjuntos criados.

Este algoritmo é tipicamente utilizado para otimização de ferramentas computacionais. É utilizado para pesquisa de resultados tendo como base um problema e um determinado objetivo de resultado [61], [58].

Este processo permite a geração de dados de uma forma direcionada, uma vez que procura os resultados coincidentes com as condições aplicadas e gera novos conjuntos a partir destes. Mas também durante a geração dos novos conjuntos existem processos, como o cruzamento cromossômico e a mutação que permitem a alteração dos cromossomas para que o algoritmo não fique viciado [62].

## 2.5.2. Método dos Mínimos Quadrados

Este método é utilizado para encontrar a curva que melhor descreve um conjunto de pontos [63].

Considerando um sistema com vários dados de entrada e assumindo que os de entrada são  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , o de saída é  $y$ ,  $a$  uma das constantes e sendo  $i$  o número de casos a ter em conta [64]:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (2.20)$$

Colocando em matrizes:

$$\begin{cases} Y = [y_1 & y_2 & \dots & y_n]^T \\ \theta = [a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{in}] \\ \varphi_i = [x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in}]^T \\ \phi = [\varphi_1^T & \varphi_2^T & \dots & \varphi_m^T]^T \end{cases} \quad (2.21)$$

Concluindo:

$$Y = \phi \cdot \theta \quad (2.22)$$

Daqui obtemos a Equação Normal:

$$\phi^T \cdot \phi \cdot \theta = \phi \cdot Y \quad (2.23)$$

Podendo organizar a equação de modo a obter os valores das constantes:

$$\theta = (\phi^T \cdot \phi)^{-1} \cdot \phi \cdot Y \quad (2.24)$$

O objetivo é encontrar os parâmetros de modo a que a distância da curva aos pontos em média sejam mínimos [65].

O erro é obtido a partir:

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (2.25)$$

## 2.6 Trabalhos relacionados

Hoje em dia tudo é feito com auxílio a um computador e a indústria não é exceção. É muito prático uma máquina que pode aferir sobre decisões e analisar dados de forma muito rápida.

Sistema de Gestão de Manutenção Informatizada (*Computerised Maintenance Management System* – CMMS) é o nome pelo qual *software* criados para a indústria da manufatura são conhecidos.

Serão apresentadas algumas técnicas utilizadas no CMMS para aperfeiçoar e melhorar as capacidades do mesmo.

### 2.6.1. Sistema de Gestão de Manutenção Informatizada

CMMS, tal como o seu nome indica, é realizado com auxílio a um programa informático criado para o efeito. Tem como principal objetivo a acumulação de um elevado volume de dados assim como a organização dos mesmos [66].

Na fábrica pode ter várias utilidades, nomeadamente, incluir alguma das seguintes aplicações e/ou funcionalidades [7]:

- Entradas de dados dos equipamentos e manutenção;
- Histórico do equipamento e do trabalho realizado;
- Controlo do inventário;
- Organização do plano de trabalho a ser realizado;
- Definição do plano de desenvolvimento, manutenção e marcação de inspeções;
- Organização dos recursos humanos;
- Organização de compras e embolsos;
- Correspondência entre faturas e dívidas.

É importante ter em consideração que o *software* só tem capacidade de funcionar corretamente após a introdução de dados concretos. Estes dados podem ser acumulados diretamente da unidade em estudo ou inseridos manualmente por um técnico.

Esta abordagem por meio de um programa informático pode ser bastante útil para aconselhar em decisões quanto às medidas preventivas que devem ser realizadas [67].

Dependendo dos dados adquiridos, o *software* pode ainda ter a capacidade de verificar o funcionamento dos diferentes constituintes/subsistemas ou comprovar em que fase do ciclo de vida é que se encontra o equipamento [68].

O CMMS é bastante eficiente no aumento da disponibilidade, desempenho e qualidade e, conseqüentemente, aumenta o tempo de vida do equipamento [69].

Este *software* pode ser utilizado para fazer simulações, insere-se assim o termo *Digital Twin*. CMMS tem a capacidade de produzir uma réplica digital do equipamento, assim simular várias hipóteses e então ponderar qual a melhor abordagem a realizar [70].

Concluindo, a implementação informática numa fábrica pode facilitar a realização das tarefas e poupar tempo a todos os trabalhadores. A capacidade de abranger e analisar informações sobre várias áreas em diversos campos, independentemente de se interligarem, é uma grande mais valia [71].

CMMS é vantajosa de ser utilizada em paralelo ou como auxiliar de outras abordagens [72], especialmente com a PM [73].

Para a implementação desta estratégia é essencial o recurso a *software* específico. No entanto, estes programas, em geral, já existem no mercado.

## **2.6.2. Na Indústria**

As funcionalidades e o design são essenciais na aquisição de um produto e um CMMS não é exceção.

No entanto, a nível mais técnico é importante oferecer ao cliente o melhor serviço e por isso devem ter-se em conta as metodologias mais recentes para a estruturação de um software para a utilidade em estudo.

Uma característica muito importante que a ferramenta deve conter é um algoritmo de inteligência artificial, para se poder aferir sobre os dados obtidos através da máquina e melhorar o seu desempenho no que respeita à tomada de decisão [74].

## Abordagem

Neste capítulo é abordado o problema em estudo assim como uma proposta de solução. Será identificado o caso de estudo, bem como os equipamentos de teste e a estruturação da Ferramenta de Apoio à Decisão (Maintenance Decision System - MDS).

Para o efeito serão definidas quais as estratégias de manutenção e os indicadores de desempenho a aplicar, assim como a integração de determinados algoritmos para permitir o desenvolvimento do algoritmo de forma mais eficiente.

### 3.1 Cenário de Estudo

Num cenário ideal seria importante ter uma amostra suficientemente grande para poder retirar conclusões. Para isso seria necessário receber dados de várias fontes que utilizem um determinado equipamento para fabricar um tipo de produto.

É importante que várias fábricas contribuam para este processo, porque permitirá uma maior diversidade de dados relativamente ao equipamento. Existiram diferentes fatores atmosféricos, métodos de trabalho, tipos de manutenções, entre outros, a contribuir para alimentar o sistema informático.

Na Figura 3.1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta-se um esquema do cenário ideal.

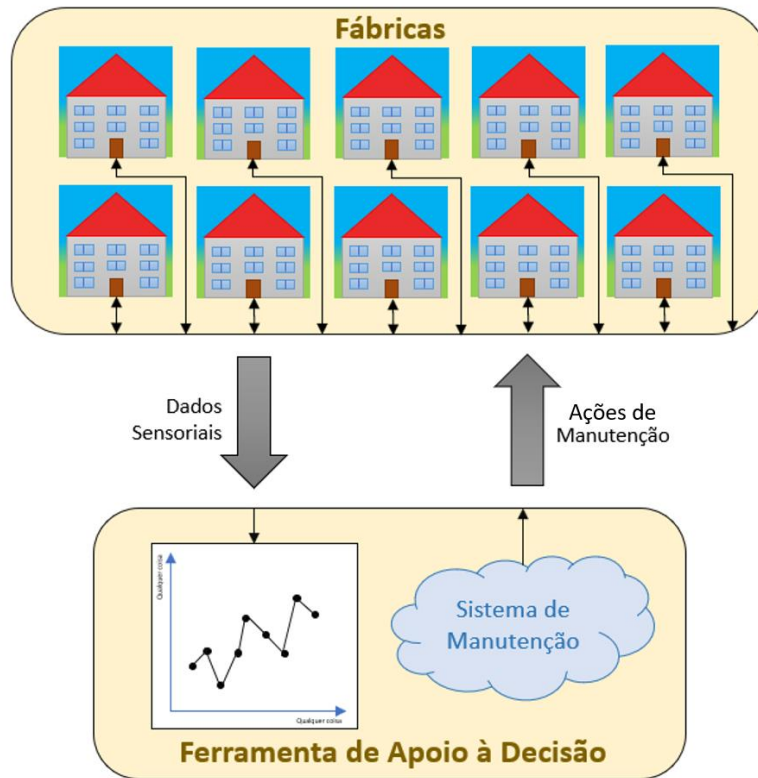


Figura 3.1 - Esquemático geral do projeto.

Um dos problemas desta abordagem seria o fator tempo, pelo facto de necessitar de dados de várias máquinas ao longo de vários anos, o que transcenderia o período do projeto. Por outro lado, após vários anos, já existirão outros equipamentos mais evoluídos e os anteriores ficarão obsoletos.

A estratégia adotada foi então criar um modelo digital que simule o desgaste de um equipamento tal como as suas quebras e tempos de manutenção.

Neste caso foi considerado um equipamento com nível 1 de complexidade traduzido visualmente como um berbequim.

O objetivo foi ter vários equipamentos a funcionar em paralelo, simulando o funcionamento dos equipamentos nas várias fábricas, incluindo as manutenções preventivas e as avarias.

O MDS, por sua vez, recebe e trata os dados do simulador a fim de gerar uma proposta da manutenção a aplicar. A proposta de manutenção deverá ter em consideração os custos.

Na vida real as mudanças podem ser causadas por diversos fatores como matéria prima e meio envolvente, que podem contribuir para o desgaste do equipamento.

A nível computacional, serão criadas perturbações no sistema para que as máquinas não se comportem todas de igual forma e sejam obtidos diferentes resultados.

O objetivo é verificar quais os resultados do MDS face a estas alterações. Assim, será implementado um processo que altera as constantes da máquina, sendo essa alteração aleatória e afetada por um fator de dispersão.

### 3.2 Equipamento

O equipamento deve ser estudado como um todo, mas para se poderem simular algumas das complexidades e discrepâncias que cada equipamento pode conter, este foi dividido em peças de funcionamento. Ou seja, considerou-se que o equipamento é constituído por duas peças que requerem manutenção, a Broca e o Motor. Assim, o Simulador aparenta um comportamento mais aproximado da realidade.

Considerando que a curva de desgaste de um equipamento é dada por:

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

onde o valor de  $\lambda(t)$  depende do tipo de peça a considerar.

Na Figura 3.2 pode ser observada uma curva de  $\lambda(t) = 1$ .

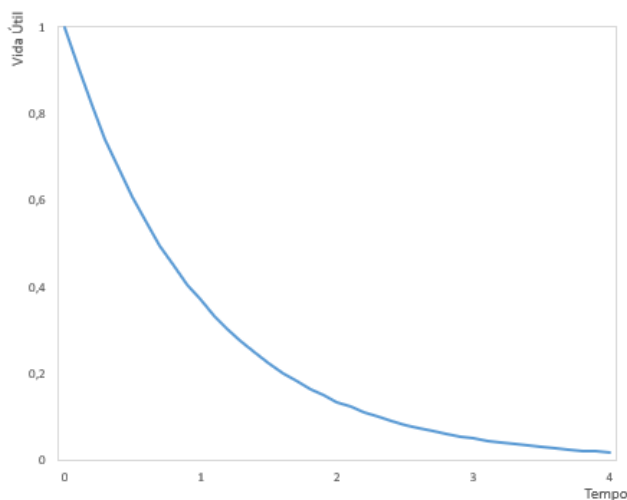


Figura 3.2 - Curva do desgaste das peças em estudo.

Para a Broca considera-se que o desgaste depende da velocidade( $w$ ) a que a está a operar, por isso:

$$\lambda_{Broca}(t) = m.w(t)$$

onde  $m$  é uma constante e  $w(t)$  a velocidade ao longo do tempo.

No caso do Motor, este deverá depender do desgaste da Broca, sendo que:

$$\lambda_{Motor}(t) = \lambda_{Motor_{max}} \cdot (1 - h_{Broca}(t))$$

onde  $\lambda_{Motor_{max}}$  é uma constante.

O objetivo é verificar a influência no motor relativamente às manutenções realizadas à broca, num determinado período. Assim, são aplicadas diferentes estratégias consoante os diferentes períodos de produção ininterrupta entre manutenções. Estas estratégias são definidas pelo número de produtos manufacturados.

Será importante definir os pontos críticos ( $h_c$ ), respetivamente, para o Motor e para a Broca. Estes pontos irão determinar o momento de rotura de cada constituinte. É importante que estas reparações sejam contabilizadas para o cálculo dos custos resultantes.

Na Tabela 3.1 está definida quais os pontos críticos definidos tanto para o Motor como para a Broca. Estes valores foram definidos de forma aleatória tendo apenas em consideração valor baixos entre [0;1] para que as máquinas tenham tempo para correr e diversificar o seu comportamento das restantes.

Tabela 3.1 – Tabulação do Valor Crítico para cada constituinte do equipamento.

	Ponto Crítico
Motor	0.1
Broca	0.09

Os custos foram outra parte importante a ser considerada. Muitas vezes quando os instrumentos deixam de funcionar corretamente é necessária uma manutenção mais intensiva porque a maior parte das vezes não se consegue identificar rapidamente o foco do problema. Assim, este custo será mais elevado do que apenas trocar um componente danificado. Seguindo esta lógica foi definida a tabela de custos Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabulação dos custos para cada tipo de manutenção.

	Descrição	Tipo de Abordagem	Custo
<b>Motor</b>	Manutenção após o Ponto Crítico	Reparação de Avaria	100
<b>Broca</b>	Manutenção após o Ponto Crítico	Reparação de Avaria	5
	Manutenção definida pela estratégia	Manutenção Preventiva	1

### 3.3 Ferramenta de Apoio à Decisão

A Ferramenta, MDS, será, de um modo geral, um sistema que recebe dados e a partir deles define qual a melhor estratégia a aplicar para reduzir custos.

Para o desenvolvimento do software e obtenção de respostas para a solução proposta é necessária a integração de estratégias de Manutenção, Indicadores de Desempenho (KPI's) e Algoritmos.

#### 3.3.1. Estratégias de Manutenção

As estratégias de manutenção descritas, são de certo modo o reflexo umas das outras com as respetivas particularidades. As Estratégias Agressivas são compostas por manutenções mais básicas.

Nos sistemas de gestão de manutenção informatizada deve ser feito um plano para estudar os equipamentos em determinados pontos de interesse a fim de detetar as suas fragilidades.

Este plano pode ter como base algumas metodologias tais como estratégias baseadas no tempo ou em condições, ou até estratégias que englobem o técnico que comunica com a máquina e perceber se este está a utilizar todo o seu potencial com o menor custo possível.

Todas estas vertentes devem ser tidas em consideração, no entanto, deve ser feita uma seleção do que é importante detalhar tendo em conta também o tempo e os custos.

Para este projeto será estudado o equipamento a partir de dados de rotura supondo que isto depende do número de produtos manufaturados. Neste caso será utilizada a Manutenção baseada em Condições para calcular qual a estratégia com menor custo.

Será também utilizada a Manutenção *Run-To-Failure* para comparar os resultados obtidos a partir do MDS e uma outra estratégia da Manutenção baseada em Condições.

As Manutenções Corretivas são realizadas sempre que exista uma rotura diretamente no equipamento ou no seu constituinte.

Existiram também Manutenções Preventivas realizadas na Broca, para evitar a danificação antecipada da máquina.

### **3.3.2. Indicadores de Desempenho**

Estes indicadores têm como objetivo fazer uma estimativa de qual o comportamento das máquinas. Isto pode ser importante para fazer uma melhor gestão da fábrica tanto a nível financeiro como de produção.

Existem vários Indicadores que avaliam o controlo das unidades de produção nas fábricas. Neste projeto os abordados foram:

- Tempo Médio entre Avarias;
- Tempo Médio entre Manutenção;
- Taxa de Avaria;
- Disponibilidade.

Os primeiros dois permitem prever os momentos em que as máquinas poderão precisar de manutenção ou reparação.

A Taxa de Avaria é uma estimativa permite estimar a taxa de avarias num determinado intervalo de tempo.

Estes três indicadores são benéficos para planear as manutenções e resoluções de avarias previamente, para uma determinada altura. Claro que o momento pode não ser exato, mas será aproximado e se existir uma rotura na máquina não acontecerá de forma inesperada.

O indicador de Disponibilidade indica o tempo estimado para a atividade da máquina, isto poderá permitir planear a integração do equipamento com a logística de funcionamento da fábrica.

### **3.3.3. Algoritmo Genético**

Neste projeto recorreu-se ao Algoritmo Genético para a identificar a estratégia menos dispendiosa. Sendo este algoritmo utilizado para a otimização de processos, aplica-se ao caso em estudo, onde é necessário gerar parâmetros de entrada para verificar qual o mais apropriado para o resultado, tendo em conta que deverá ser o que tem menor custo.

O simulador desenvolvido representa dezasseis máquinas a funcionar que serão divididas em grupos de quatro e, em cada grupo, será aplicada uma estratégia de manutenção, medida pelo número de produtos manufacturados.

Posteriormente, será encontrada uma média de custos referente a cada estratégia aplicada que será o valor recebido pelo algoritmo.

O tratamento dos dados é realizado de modo a detetar qual o custo mínimo encontrado.

A partir da melhor estratégia encontrada serão geradas quatro novas estratégias todas aleatórias. No entanto, três delas serão próximas das estratégias mínimas encontradas. O restante grupo terá uma estratégia gerada aleatoriamente. Este passo é importante para que o algoritmo não corra o risco de permanecer num mínimo local.

De seguida, devem ser aplicadas as novas estratégias e os conjuntos reagrupados para que quando for gerada dispersão para aumentar a aleatoriedade na aplicação das estratégias.

Na Figura 3.3 foi descrito um pequeno algoritmo com o descritivo dos passos necessários para a geração de parâmetros que originam o custo mínimo, associado às diferentes fases do Algoritmo Genético.

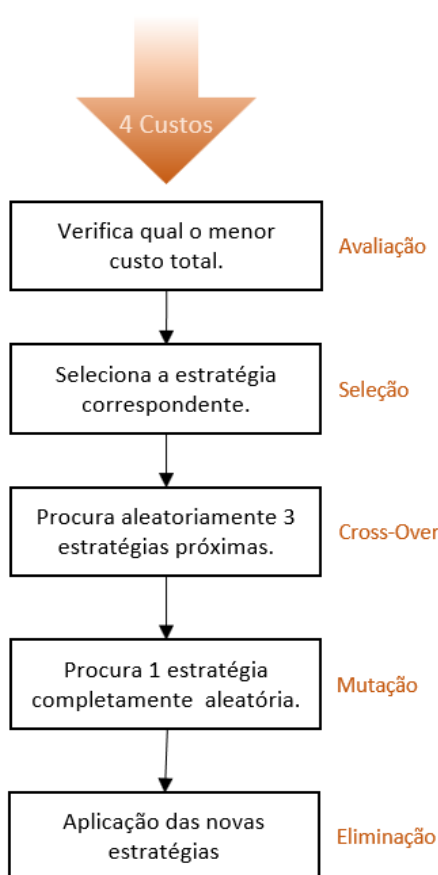


Figura 3.3 - Funcionamento do Algoritmo Genético.

À medida que o simulador gera dados estes são representados graficamente por pontos de acordo com as variáveis “Nº de Produtos vs Custos”. Será desenhada uma curva que tem em conta todas as estratégias aplicadas e, conseqüentemente, seleciona a melhor estratégia encontrada nas populações geradas.

### 3.3.4. Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados é utilizado, neste projeto, para organizar a dispersão de pontos gerados pela aplicação das várias estratégias.

Para a representação gráfica do conjunto de pontos “Nº de Produtos vs Custos” foi escolhida a parábola porque é uma função que apresenta apenas um mínimo quando a concavidade é voltada para cima.

Partindo do pressuposto de que a curva coincide com uma parábola, a expressão resultante da curva a desenhar deverá ser:

$$Custo = a.Prod^2 + b.Prod + c \quad (3.1)$$

Partindo da equação principal do método, (2.24), é necessário definir as variáveis para obter os valores das constantes “a”, “b” e “c”.

Através da equação (2.22) podemos concluir que,

$$[Custo] = \begin{bmatrix} Prod^2 \\ Prod \\ 1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Definindo assim as seguintes variáveis:

$$\varphi_i = \begin{bmatrix} Prod_i^2 \\ Prod_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \varphi_1^T \\ \varphi_2^T \\ \vdots \\ \varphi_n^T \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Custo_1 \\ Custo_2 \\ \vdots \\ Custo_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

O valor de n será definido por o número de estratégias aplicada até finalizar. Será aplicada uma quantidade limitada de combinações de máquinas para formar os grupos para que, quando o ruído for aplicado, existir uma distribuição aleatória de máquinas.

Para calcular o valor do erro é utilizado:

$$Erro(k) = Custo(k) - \widehat{Custo}(k) \quad (3.6)$$

Ao obter este valor é feita uma média dos erros para desenhar duas curvas representativas.





## Desenvolvimento

A parte prática foi desenvolvida em Java utilizando a sua interface gráfica para a aplicação de contacto com o utilizador.

### 4.1 Esquema Geral

O desenvolvimento do projeto foi dividido em dois blocos principais, o Simulador e a Ferramenta de Apoio à Decisão, MDS, ambos desenvolvidos em Java.

O Simulador foi criado para encenar o funcionamento do equipamento como se estivesse numa fábrica.

O MDS é composto pelo algoritmo que estuda o funcionamento dos equipamentos e define a melhor estratégia de acordo com os dados que recebeu.

### 4.2 Simulador

O Simulador é constituído por quatro ecrãs, um principal onde se pode visualizar as máquinas a funcionarem e onde é realizado o contacto com o utilizador, e os secundários que permitem verificar detalhes do funcionamento das máquinas.

O ecrã principal denominado “*Generic*” está dividido em quatro zonas:

- Equipamentos;
- Botões de controlo dos equipamentos;
- Controlo de parâmetros técnicos dos equipamentos;
- Definição de estratégias.

Existem dezasseis equipamentos distribuídos numa matriz quatro por quatro, que são ativados por 4 botões com opções para ligar, desligar, reparar e colocar em manutenção.

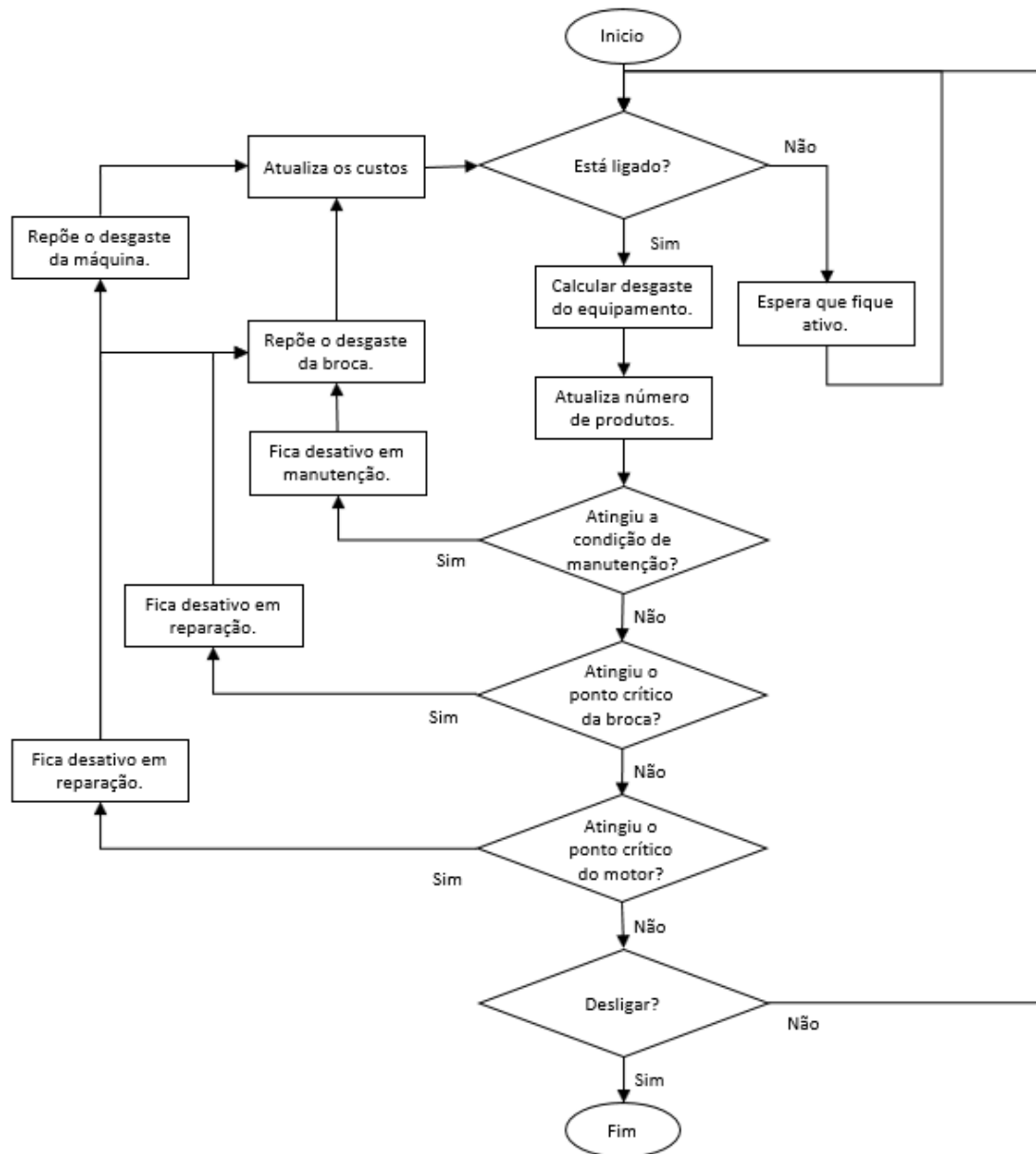


Figura 4.1 - Algoritmo do equipamento.

Foram criadas também duas fontes de controlo que definem a velocidade de execução e a dispersão dos equipamentos. O *Spinner* que altera a velocidade de execução, permite ultrapassar o fator tempo e acelerar o processo para obter mais rapidamente os resultados. A dispersão é gerada para alterar as constantes relativas ao modelo do equipamento.

Por último, foram colocados três botões que permitem definir estratégias a aplicar nas máquinas, podem ser *Run-to-Failure*, Manutenção baseada em Condições e por último a estratégia encontrada como a menos dispendiosa pelo MDS.

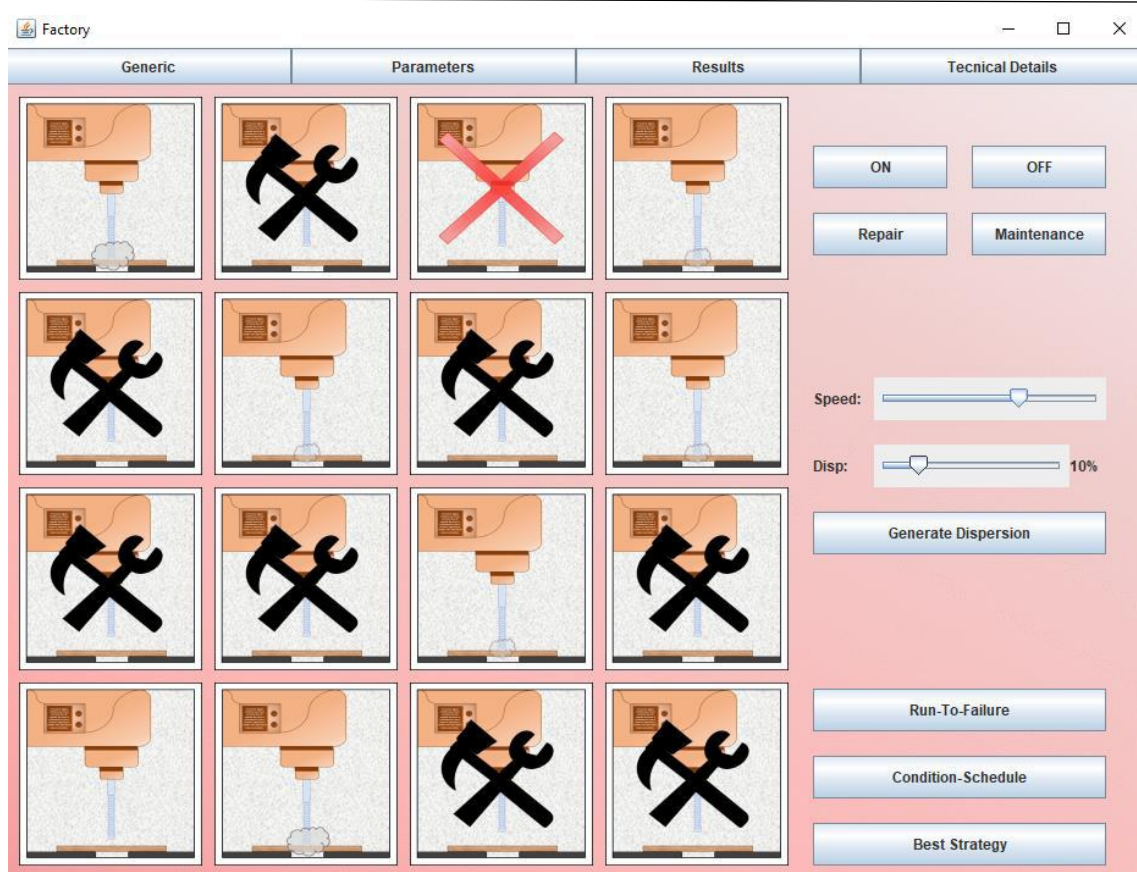


Figura 4.2 - Ecrã "Generic".

O segundo ecrã, "Parameters", permite definir determinados parâmetros das máquinas individualmente para poder gerar dispersão manualmente. Pode ser alterada a velocidade de funcionamento da máquina e o número de produtos fabricados até existir uma manutenção na broca.

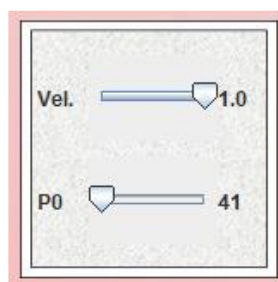


Figura 4.3 - Ecrã "Parameters" referente a um equipamento.

O ecrã de "Results" reflete o número de produtos que foi fabricado antes da última manutenção ou reparação de cada máquina.



Figura 4.4 - Ecrã "Results" referente a um equipamento.

Por último, foi criado o ecrã "Technical Details" que contém os detalhes referentes às manutenções, i.e., as intervenções efetuadas à broca tanto por quebra como manutenções programadas e as reparações à máquina.

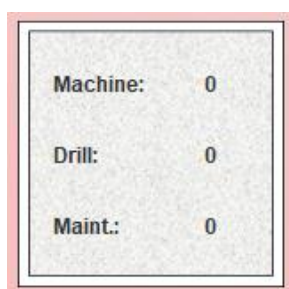


Figura 4.5 - Ecrã "Technical Details" referente a um equipamento.

O simulador tem dois modos de atuar. No primeiro, os equipamentos são controlados pelo MDS, são ligados, desligados e as estratégias são definidas pela ferramenta.

Quando o simulador acaba o período de funcionamento, é apresentada uma janela que contém os custos e indicadores de desempenho.

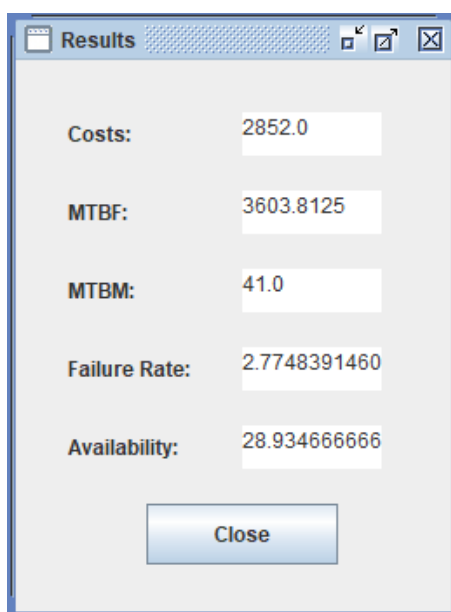


Figura 4.6 - Ecrã com os resultados dos custos e indicadores.

O outro modo é apenas utilizado o simulador testar casos e verificar o efeito das estratégias e dispersões nos equipamentos, funciona assim independente do MDS.

O Apêndice B contém uma explicação mais detalhada do Funcionamento do Simulador.

### 4.3 MDS

A Ferramenta tem como efeito visual um gráfico que é alterado ao longo do tempo consoante os pontos gerados pelo funcionamento das máquinas.

Contém ainda um botão, “Start”, que inicia todo o processo para calcular a estratégia menos dispendiosa.

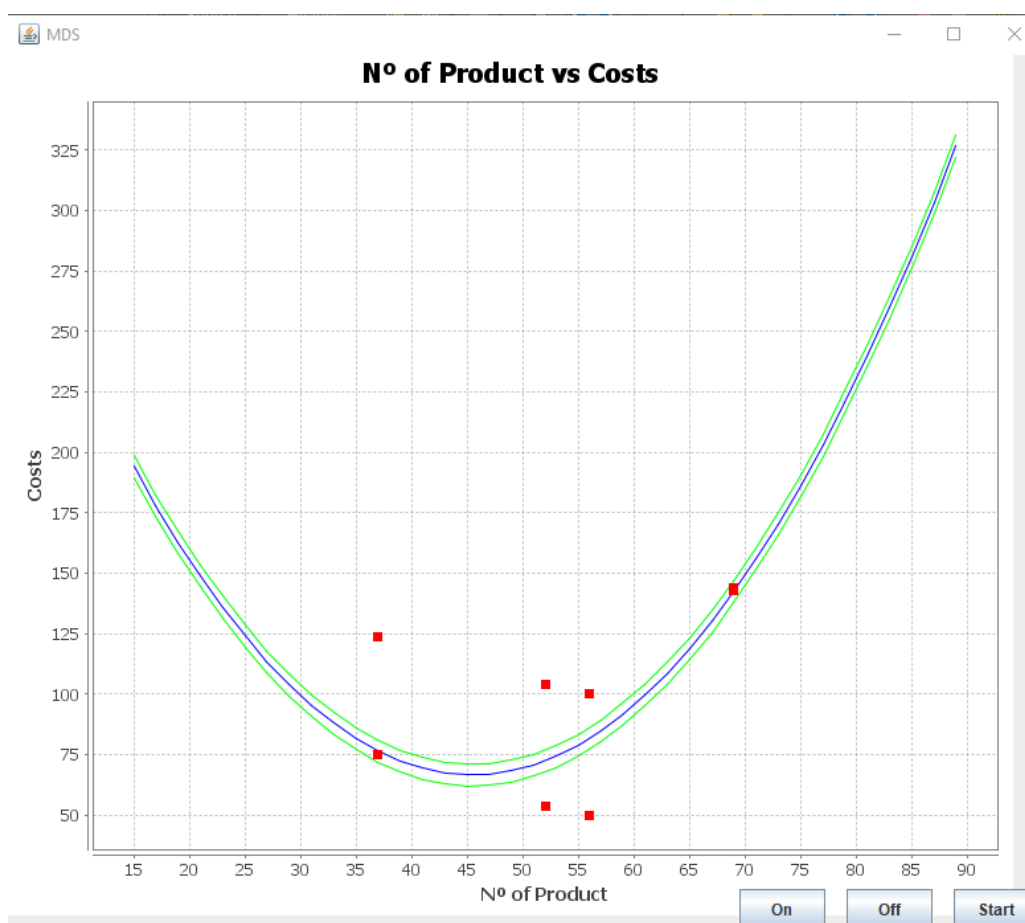


Figura 4.7 - Ecrã "MDS".

Na Figura 4.7 podem ser observados os resultados de custos em cada ciclo de tempo, para quatro estratégias diferentes, representados pelos pontos a vermelho. Neste caso já tinham passado dois ciclos de tempo.

Inicialmente, foi aplicado o Algoritmo Genético para gerar quatro estratégias aleatórias.

A azul está o resultado da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados, associados aos pontos já inseridos no gráfico.

A verde, estão representadas as margens de erro calculadas pela distância média dos pontos à reta.

Para inserir ruído é necessário inserir dispersão no ecrã do simulador inicialmente.

Foram realizadas 20 estratégias por cada máquina e cada simulação é dividida em 20 ciclos de tempo. Ao fim de cada ciclo foram calculados os custos associados a cada máquina.

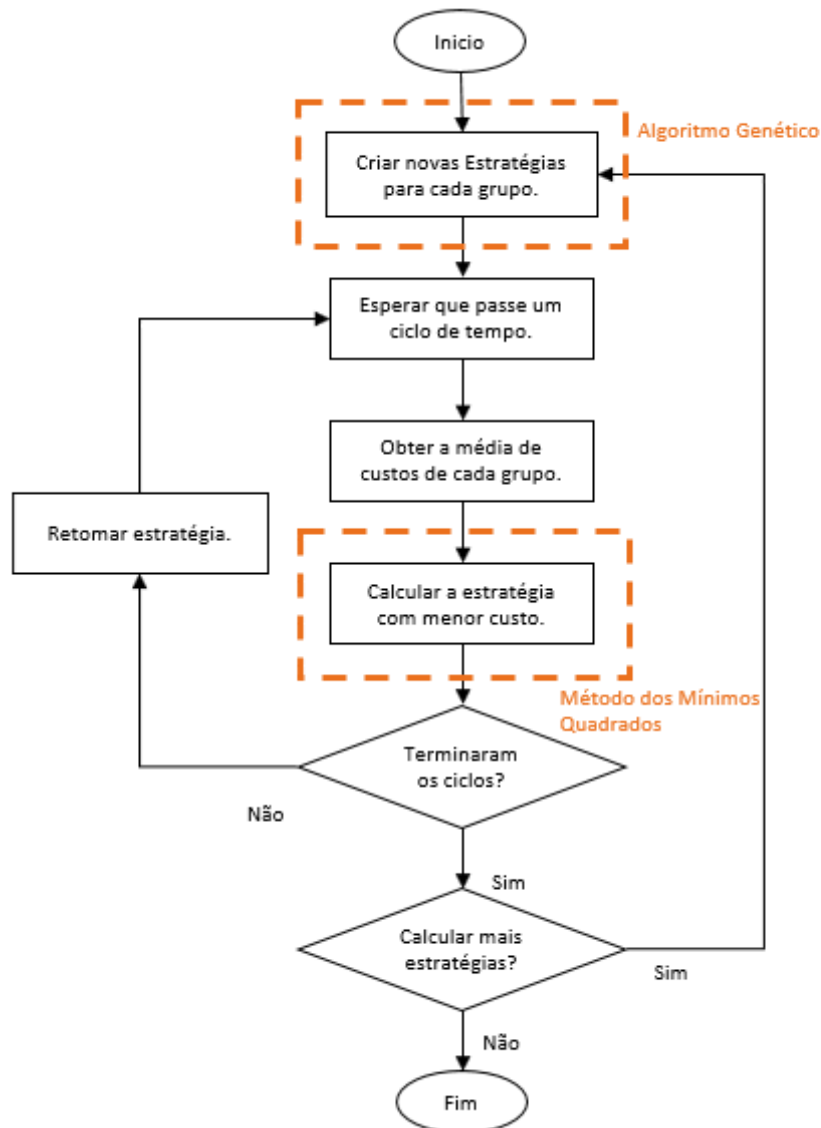


Figura 4.8 - Algoritmo do MDS.

Em cada grupo de máquinas com as mesmas estratégias, foi calculada uma média de custos e posteriormente esse resultado foi refletido no gráfico.

Ao fim de cada ciclo é também recalculada a curva resultante da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados assim como a margem de erro associada.

## Capítulo: Desenvolvimento

---

A margem do erro é calculada a partir do erro médio dos pontos com a curva encontrada.

O Apêndice A tem informação mais detalhada da comunicação do MDS com o utilizador.





## Resultados

Este capítulo visa listar e ponderar acerca dos resultados obtidos através do Simulador a partir de três Estratégias de Manutenção.

Os dados foram retirados em duas fases distintas.

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos nos testes feitos no Simulador utilizando para o efeito o auxílio da ferramenta MDS.

De seguida, será efetuada a comparação entre estratégias e feita uma reflexão sobre os resultados tendo em conta a objetividade neles contida.

Os testes serão realizados, inicialmente, como se o sistema fosse perfeito e os equipamentos todos iguais, mas serão também realizados testes com ruído no sistema para apurar qual o comportamento do algoritmo e das máquinas às mudanças nos equipamentos.

### 5.1 Primeira Fase

Numa primeira fase foram retirados dados utilizando o MDS para apurar qual a melhor estratégia a aplicar.

Os testes foram realizados alterando a dispersão para verificar qual a abordagem com menor custo médio por ciclo de tempo.

Tabela 5.1 - Resultados de custos do MDS.

Dispersão (%)	P0 (nº. produtos)	Custo Médio
0	45	132
5	45	128
10	41	135
15	45	127
20	35	150
25	35	145
<b>Média</b>	<b>41</b>	

Tendo em conta os dados da Tabela 5.1, verifica-se no caso em que o sistema não contém ruído que a melhor estratégia é quando  $p_0$  é 45.

No entanto, ao considerarmos adicionalmente a dispersão de valores que originam o ruído, obtém-se uma média para  $p_0$  de 41.

Num sistema real existem variações no funcionamento das máquinas, assim, não seria correto considerar que a melhor estratégia é o valor sem dispersão ( $p_0 = 45$ ), tal como não seria aceitável afirmar que seria qualquer outro valor de dispersão ( $p_0 = 41$ ). Por isto, considera-se o valor da média o mais confiável como valor final.

## 5.2 Segunda Fase

Na segunda fase, foram retirados dados com base nas três estratégias em estudo:

- *Run-To-Failure*;
- Manutenção baseada em Condições;
- Estratégia encontrada na primeira abordagem aplicada.

As últimas duas são Manutenções baseadas em Condições, embora a primeira tenha um  $p_0$  igual a 20, um valor mais baixo do que a estratégia em estudo. Esta verificação é importante para comparar quais os resultados quando existe manutenção excessiva.

As duas primeiras estratégias são opostas. Numa não existe qualquer tipo de manutenção, apenas quando falha é corrigida. Na outra, existe manutenção em curtos espaços

## Capítulo: Resultados

de tempo. A estratégia encontrada na primeira fase, será um equilíbrio entre a manutenção intensiva e a nula.

O objetivo é comparar os valores entre cada estratégia aplicada para que as diferenças possam ser notadas e estudadas.

Os resultados obtidos foram de custos e dos KPI's à medida que se alteravam os valores de dispersão para cada estratégia.

Tal como na primeira fase da geração de resultados, para cada um dos resultados foi aplicada a média das dispersões para cada estratégia. Assim, pode observar-se a estratégia como um todo e não consoante a dispersão aplicada, uma vez que num sistema real isso não seria possível contabilizar.

*Tabela 5.2 - Resultados de Custos da Simulação.*

Dispersão (%)	Tipo de Estratégia		
	<i>Run-To-Failure</i>	MDS	CBM
0	5515	2853	3303
5	5320	2708	3266
10	5724	2852	3334
15	5439	2786	3290
20	5784	3077	3464
25	5194	2450	3117
<b>Média</b>	<b>5496.00</b>	<b>2781.67</b>	<b>3595.67</b>

Na Tabela 5.2 pode observar-se o somatório dos custos ao longo de um determinado tempo para cada estratégia e dispersão, respetivamente.

Para que seja visível qual a estratégia com menor custo comparativamente com as restantes, pode ser observado o Gráfico 5.1.

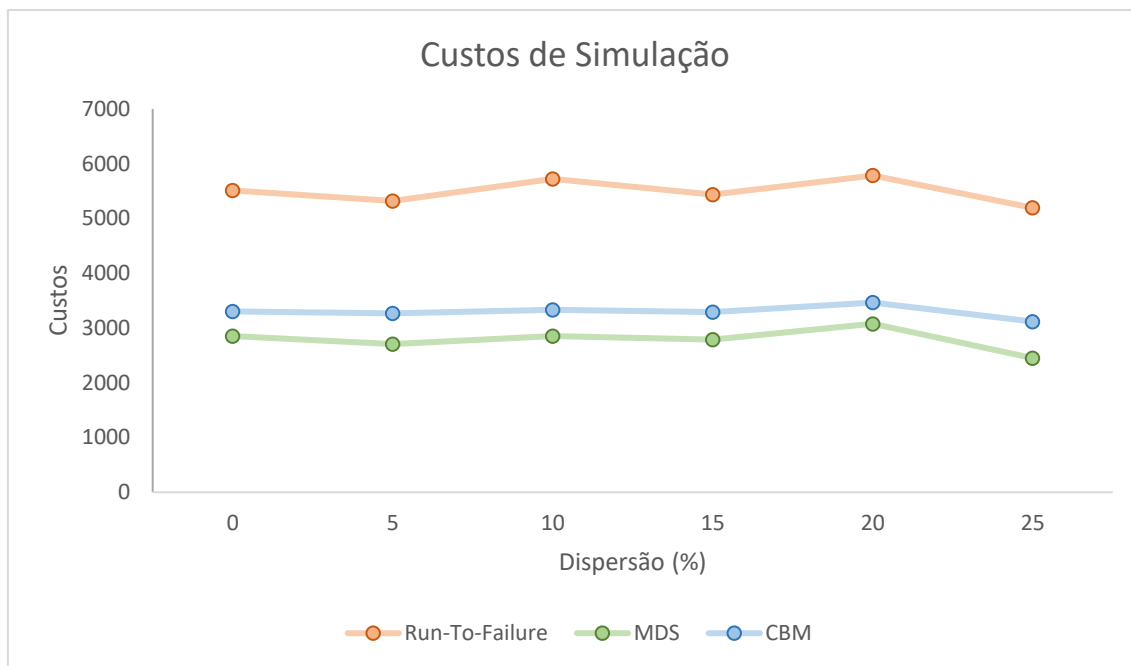


Gráfico 5.1 - Custos de Simulação para cada estratégia estudada.

Verifica-se que a estratégia menos dispendiosa é a encontrada a partir da ferramenta de apoio à decisão, MDS.

Tabela 5.3 - Resultados de MTBF da Simulação.

Dispersão (%)	Tipo de Estratégia		
	Run-To-Failure	MDS	CBM
0	113.0	3554	5098.0
5	121.625	3655.3125	6192.3125
10	126.0625	3603.8125	6048.875
15	146.125	4829.5	4038.375
20	173.8125	3180.5625	4061.875
25	161.0625	3800.625	3765.3125
<b>Média</b>	<b>140.28</b>	<b>3770.64</b>	<b>4867.46</b>

O Tempo Médio entre Reparações, MTBF, está representado na Tabela 5.3, onde estão os valores rigorosos, e no Gráfico 5.2, para visualizar as curvas.

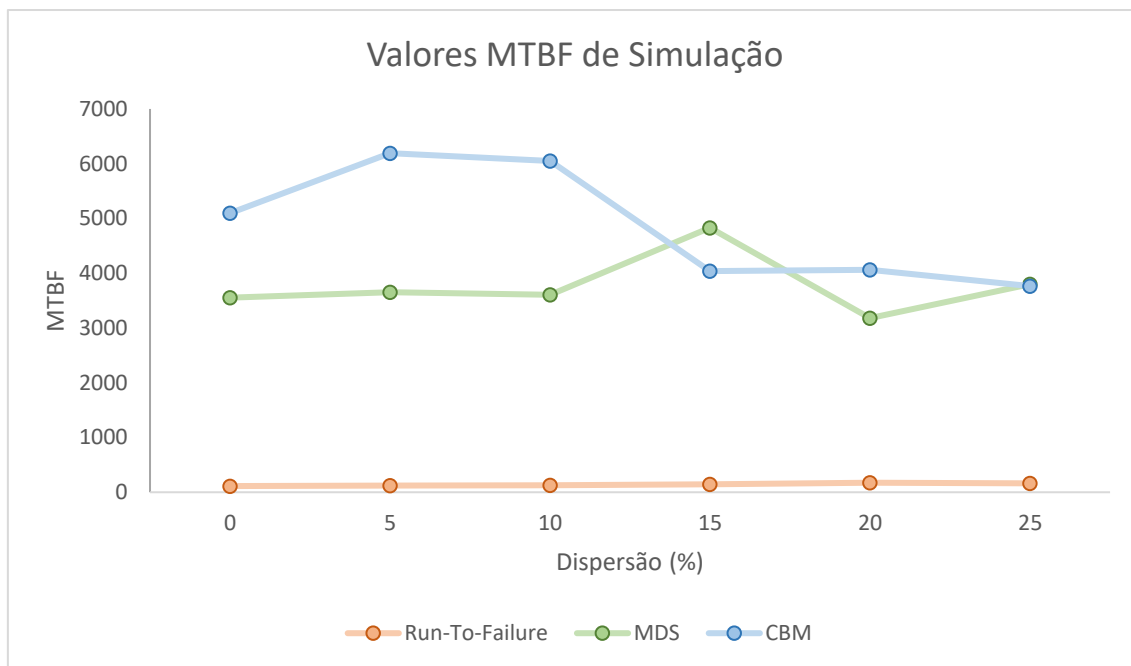


Gráfico 5.2 - Valores MTBF de Simulação para cada estratégia estudada.

A estratégia que tem maior tempo entre reparações é, em média, a CBM e a que tem menor é, visivelmente, a estratégia *Run-To-Failure*.

Tabela 5.4 - Resultados de MTBM da Simulação.

Dispersão (%)	Tipo de Estratégia		
	<i>Run-To-Failure</i>	MDS	CBM
0	N/A	41.0	24.7797
5	N/A	49.25	24.3125
10	N/A	41.0	20.0
15	N/A	41.0	19.8125
20	N/A	40.875	24.1875
25	N/A	40.9375	19.75
<b>Média</b>	<b>N/A</b>	<b>42.34</b>	<b>22.14</b>

Para o Tempo Médio entre Manutenções, MTBM, foi construída a Tabela 5.4 e, posteriormente, o Gráfico 5.3.

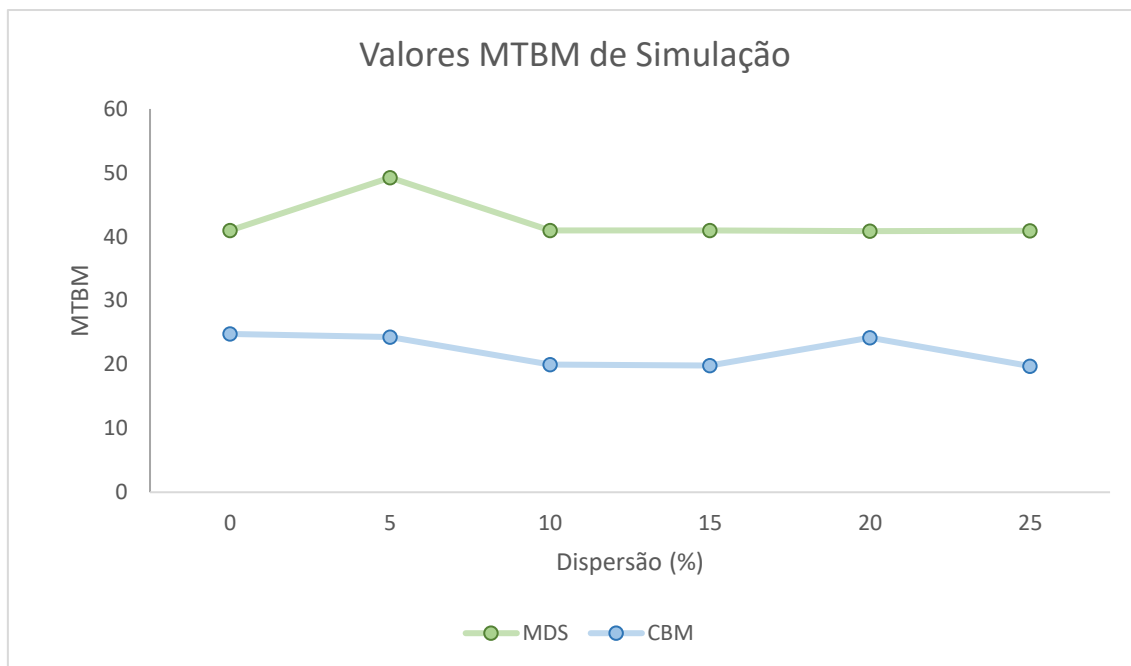


Gráfico 5.3 - Valores MTBM de Simulação para cada estratégia estudada.

*Run-To-Failure* foi a estratégia com o valor mais baixo, enquanto que a do MDS foi a que foi encontrada como menor tempo médio entre manutenções.

Tabela 5.5 - Resultados de Taxa de Avaria da Simulação.

Dispersão (%)	Tipo de Estratégia ( $\times 10^{-4}$ )		
	<i>Run-To-Failure</i>	MDS	CBM
0	88.4956	2.8137	1.9615
5	82.222	2.7359	1.6149
10	79.325	2.7748	1.6532
15	68.4346	2.0706	2.4762
20	57.5333	3.1441	2.4619
25	62.087	2.6311	2.6558
<b>Média</b>	<b>73.02</b>	<b>2.69</b>	<b>2.14</b>

Os resultados da Taxa de Avaria estão na Tabela 5.5. No Gráfico 5.4 também pode ser feita uma observação das curvas obtidas com a Simulação.

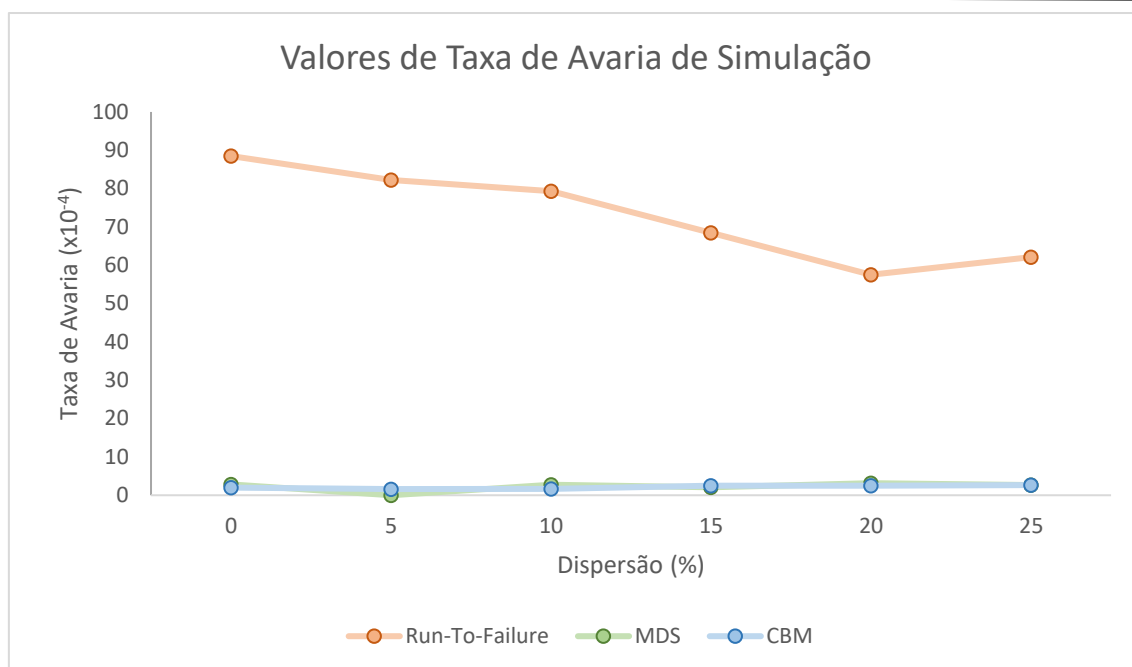


Gráfico 5.4 - Valores de Taxa de Avaria de Simulação para cada estratégia estudada.

Os resultados mais elevados dizem respeito ao *Run-To-Failure* e os mais baixo, em média, à estratégia de *CBM*.

Tabela 5.6 - Resultados de Disponibilidade da Simulação.

Dispersão (%)	Tipo de Estratégia		
	<i>Run-To-Failure</i>	MDS	CBM
0	15.5712	30.0629	24.7797
5	15.5316	49.52	28.6721
10	15.1586	28.9347	25.5977
15	15.5077	28.2536	22.1571
20	15.511	26.7097	26.3022
25	15.5003	26.4329	20.6109
<b>Média</b>	<b>15.55</b>	<b>31.65</b>	<b>24.69</b>

A Tabela 5.6 contém os dados relativos à Disponibilidade dos equipamentos. Para que seja mais fácil a comparação entre as três estratégias foi construído o Gráfico 5.5.

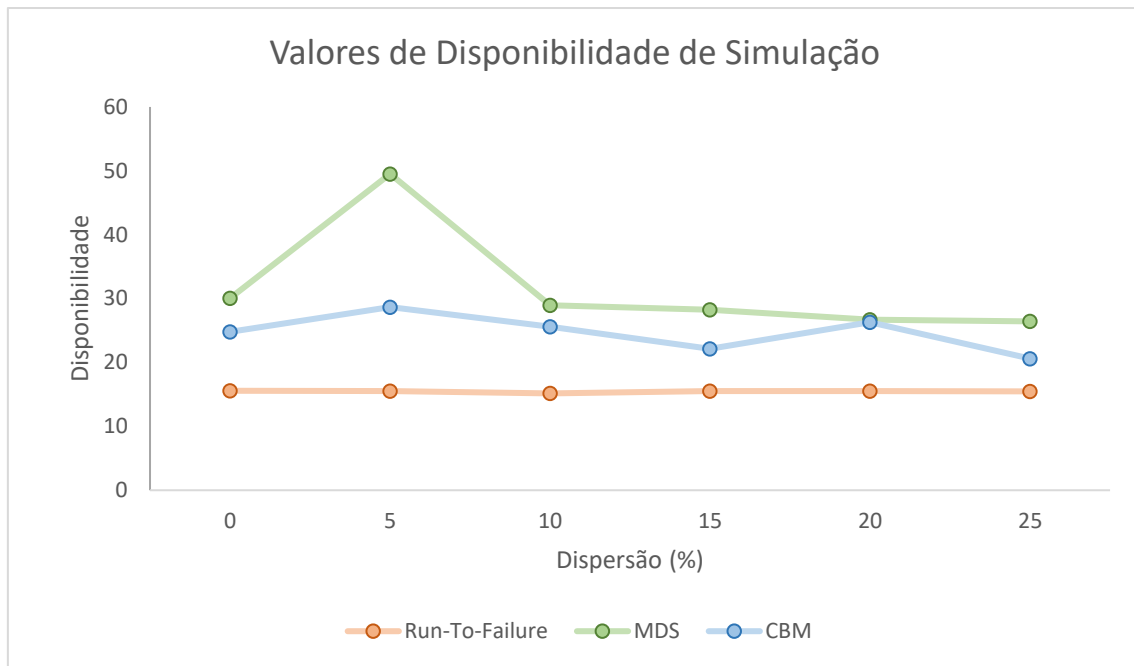


Gráfico 5.5 - Valores de Disponibilidade de Simulação para cada estratégia estudada.

No Gráfico 5.5 é observável que o MDS tem maior índice de disponibilidade do que os restantes.

### 5.3 Discussão de Resultados

Neste subcapítulo será realizada uma apreciação aos resultados obtidos e verificar a lógica por detrás dos mesmos.

Na Tabela 5.7 estão expressos os resultados adquiridos através da média de cada estratégia para cada indicador.

Tabela 5.7 - Resumo dos resultados obtidos.

Média	Tipo de Estratégia		
	<i>Run-To-Failure</i>	MDS	CBM
Custos	5496	2781.67	3595.67
MTBF	140.28	3770.64	4867.46
MTBM	N/A	42.34	22.14
Taxa de Avaria	73.02	31.65	24.69
Disponibilidade	0.0	2.69	2.14

Como seria de esperar a estratégia com menor custo é relativa ao MDS, sendo este o critério de escolha.

No tempo médio entre falhas, MTBF, é espetável que o *Run-To-Failure* seja o menor valor encontrado. O objetivo desta estratégia é esperar até que a falha ocorra, enquanto que as restantes vão sofrendo manutenções o que faz com que as reparações sejam adiadas.

Como no CBM existem manutenções frequentes é também previsível que tenha o MTBF mais elevado do que o MDS, ou seja, que exista mais tempo entre falhas uma vez que as manutenções constantes fazem com que os instrumentos não se degradem tão rapidamente, logo exista menos necessidade de reparação.

No caso de *Run-To-Failure* o Indicador MTBM não é aplicado porque não são aplicadas manutenções, apenas reparações.

Quanto às restantes estratégias é de esperar que existam mais manutenções no CBM, o que indica menos tempo entre cada uma, logo menor valor de MTBM.

A Taxa de Avaria é inversa ao MTBF, assim é de esperar que tenha resultados inversos. Este indicador simboliza, tal como o nome indica, a frequência com que ocorre a avaria.

Assim a estratégia *Run-To-Failure* é a que mais sobressai tendo um valor mais elevado do que as restantes estratégias, o que faz todo o sentido, pois é a estratégia que mais reparações sofre uma vez que não faz nada para evitar as falhas.

A Disponibilidade é o indicador que demonstra o tempo de funcionamento do equipamento. O *Run-To-Failure* tem reparações frequentes, assim é de mais provável que a disponibilidade não seja muito elevada, tal como o CBM que tem manutenções constantes. Por estes motivos, é de esperar que o MDS tenha maior disponibilidade do que as restantes estratégias.





## Considerações Finais

Este capítulo foi dividido em dois subcapítulos: Conclusões e Propostas de trabalhos futuros.

Na Conclusão foi realizada uma revisão geral ao projeto tendo em conta os objetivos, pontos positivos e negativos.

Por último, foram descritos certos pontos onde o projeto poderia crescer e melhorar, assim como outros projetos no mesmo âmbito como contribuição para a área de estudo.

### 6.1 Conclusões

O objetivo do projeto foi desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão na indústria para redução de custos de manutenção.

A proposta desenvolvida foi criar um modelo que simule as manutenções e reparações num equipamento para então verificar os custos. Assim, a partir da análise de resultados concluiu-se que o objetivo principal foi cumprido, analisando e comparando as estratégias aplicadas e tendo em conta os custos.

Se fossem aplicados outros custos a cada tipo de manutenção ou reparações os resultados seriam afetados.

Nos resultados foram também adquiridos dados sobre o tempo de produção e verificou-se que a estratégia identificada obtém maior tempo de atividade o que vai permitir ao utilizador produzir mais entre interrupções aumentando, consequentemente, a receita.

A partir dos restantes indicadores calculados, podem ser estimados os tempos de reparação e de manutenção das máquinas. Isto pode ser vantajoso, por exemplo, no caso em que o proprietário do equipamento quiser fazer uma gestão mais assertiva da disponibilidade da máquina na fábrica, ou até um planeamento das reparações que venham a ser efetuadas.

Este projeto, como atrás referido, contribui especificamente para a área de gestão de equipamentos tendo em conta a redução de custos e aumento da produtividade, tanto pode ser direcionado para os fabricantes como para os utilizadores.

Este trabalho prático tem estrutura para impulsionar novos desenvolvimentos com maior complexidade e inspirar novos projetos no mesmo âmbito.

Durante o desenvolvimento da dissertação foram sentidas algumas dificuldades, tanto na parte teórica como na prática.

Numa primeira fase, existiu necessidade de definir quais os tópicos mais importantes para abordar no Estado de Arte. O mundo da manutenção é muito extenso e existem inúmeras Estratégias de Manutenção e Indicadores de Desempenho, por isso foi importante organizar a informação por módulos e detetar quais os temas a descrever.

Para definir a abordagem a utilizar foi necessário estipular limites para realizar a dissertação. Este passo tornou-se um dilema porque existem vários detalhes e desenvolvimentos que poderiam ter sido implementados, no entanto optou-se por uma base estrutural que se considerou essencial para o início do projeto.

Após a organização e estruturação da abordagem tornou-se mais rápida e fácil a implementação do projeto.

Na parte prática, foi utilizada a ferramenta GUI do java e por isso foi necessário explorá-la para retirar o melhor partido das suas capacidades no desenvolvimento.

## 6.2 Proposta de Trabalhos Futuros

Este projeto poderá evoluir por várias vertentes.

O algoritmo poderá ter em consideração outros dados relativos ao equipamento tais como informações adquiridas a partir de sensores que serão mais eficientes.

No caso de poderem existir dados reais de sensores, será possível criar um modelo que funcione em tempo real paralelamente aos equipamentos nas fábricas. Ao criar esta dinâmica será possível disponibilizar informações sobre o equipamento e alterar o modelo consoante os dados fornecidos. Assim, poderá ser criado um modelo *digital twin* o que será benéfico tanto para o utilizador como para o fabricante.

Ao serem utilizados outro tipo de dados de *input* poderá obter-se um momento de manutenção com menor erro e também qual o tipo a aplicar e em que componente.

O caso de estudo poderá basear-se na produtividade do equipamento e daí existir uma necessidade de perceber a diferença de produção consoante o técnico que opera a máquina, ou até a temperatura ambiente da sala. Perceber se os produtos manufacturados têm mais

## Capítulo: Considerações Finais

---

probabilidade de ficar melhores quando a máquina funciona em determinadas condições, humidade, temperaturas, etc.

Concluindo, pode ser otimizada a ferramenta e tornar-se mais complexa tendo em conta várias variáveis e detalhes físicos que influenciam o estado da máquina.





## Bibliografía

- [1] N. S. Arunraj and J. Maiti, "Risk-based maintenance-Techniques and applications," *J. Hazard. Mater.*, vol. 142, no. 3, pp. 653–661, 2007.
- [2] L. Swanson, "Linking maintenance strategies to performance," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 70, pp. 237–244, 2001.
- [3] S. K. Pinjala, L. Pintelon, and A. Vereecke, "An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 104, no. 1, pp. 214–229, 2006.
- [4] D. Parmenter, *Key Performance Indicators: Developing Implementing, and Using Winning KPIs*. 2007.
- [5] M. Sondalini and H. Witt, "What is Equipment Reliability and How Do You Get It?," *Time*, pp. 1–12, 2004.
- [6] A. Rose, "What is Reliability Centered Maintenance ? A Brief History of RCM RCM in the Facility and Utility Arena," 2002.
- [7] R. Fei, R. K. Mobley, and D. J. Wikoff, *Maintenance Engineering Handbook*, vol. 7. 2008.
- [8] H. P. Barringer and H. Hotel, "Availability , Reliability , Maintainability , and Capability," 1997.
- [9] R. Benz, O. Fröhlich, P. Läger, and M. Montal, *Electrical capacity of black lipid films and of lipid bilayers made from monolayers*, vol. 394, no. 3. 1975.
- [10] "Welcome to L&MR." [Online]. Available: [https://www.acq.osd.mil/log/mr/mean\\_down\\_time.html](https://www.acq.osd.mil/log/mr/mean_down_time.html). [Accessed: 03-Mar-2018].
- [11] "How to Calculate Failure Rates | Sciencing." [Online]. Available: <https://sciencing.com/calculate-failure-rates-6403358.html>. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [12] "Measuring Machine Reliability: 5 Key Metrics." [Online]. Available: <http://blog.uslube.com/measuring-machine-reliability-5-key-metrics>. [Accessed: 24-Feb-2018].
- [13] "System Availability | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/how-do-maintainability-and-reliability-affect-availability/>. [Accessed: 15-Feb-2018].
- [14] "Calculate OEE – Definitions, Formulas, and Examples." [Online]. Available:

- <https://www.oeo.com/calculating-oeo.html>. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [15] M. M. Ahmad and N. Dhafr, "Establishing and improving manufacturing performance measures," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 3–4, pp. 171–176, 2002.
- [16] M. Ben-Daya and S. O. Duffuaa, "Maintenance and quality: the missing link," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–26, 1995.
- [17] "Factor of Safety in Design and Engineering: The Basics." [Online]. Available: <https://www.creativemechanisms.com/blog/factor-of-safety-in-design-and-engineering-the-basics>. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [18] "Reliability What Is It? / Asset Management / Maintworld." [Online]. Available: <http://www.maintworld.com/Asset-Management/Reliability-What-Is-It>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [19] "Overall Equipment Effectiveness | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/advanced-cmms-metrics-overall-equipment-effectiveness/>. [Accessed: 15-Feb-2018].
- [20] "What is reactive strategy? definition and meaning - BusinessDictionary.com." [Online]. Available: <http://www.businessdictionary.com/definition/reactive-strategy.html>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [21] "What is breakdown maintenance? | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/breakdown-maintenance/>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [22] "Run to Failure Maintenance (RTF) Planning | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/run-to-failure-maintenance/>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [23] "Reactive Maintenance Planning | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/maintenance-strategies/reactive-maintenance/>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [24] A. Starr, B. Al-Najjar, K. Holmberg, E. Jantunen, J. Bellew, and A. Albarbar, "Maintenance Today and Future Trends," *E-maintenance*, pp. 5–37, 2010.
- [25] H. Erbe *et al.*, *Infotronic technologies for e-maintenance regarding the cost aspects*, vol. 16, no. 1. IFAC, 2005.
- [26] "Reactive Maintenance | Estates & Campus Services." [Online]. Available: <http://estates.lincoln.ac.uk/services/maintenance/reactive/>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [27] "What is Reactive Maintenance in Real Estate." [Online]. Available: <https://www.enertiv.com/resources/what-is-reactive-maintenance>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [28] "The Advantages & Disadvantages of Reactive Maintenance | GNB Software Blog." [Online]. Available: <http://www.gnbsoftware.co.uk/blog/the-advantages-disadvantages-of-reactive-maintenance/>. [Accessed: 25-Feb-2018].
- [29] "What is corrective maintenance? definition and meaning - BusinessDictionary.com." [Online]. Available: <http://www.businessdictionary.com/definition/corrective-maintenance.html>. [Accessed: 26-Feb-2018].
- [30] "What is corrective maintenance? | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/corrective-maintenance/>. [Accessed: 26-Feb-2018].
- [31] Y. Wang, C. Deng, J. Wu, Y. Wang, and Y. Xiong, "A corrective maintenance scheme for

- engineering equipment," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 36, pp. 269–283, 2014.
- [32] J. P. Kenné and A. Gharbi, "Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 46, no. 4 SPEC. ISS., pp. 865–875, 2004.
- [33] "Corrective Maintenance: Definition, Objectives and Limitations." [Online]. Available: <http://www.yourarticlelibrary.com/maintenance-management/corrective-maintenance-definition-objectives-and-limitations/90694>. [Accessed: 26-Feb-2018].
- [34] "What is proactive strategy? definition and meaning - BusinessDictionary.com." [Online]. Available: <http://www.businessdictionary.com/definition/proactive-strategy.html>. [Accessed: 26-Feb-2018].
- [35] A. P. Trust, "Periodic and Sequential Preventive Maintenance Policies Author ( s ): Toshio Nakagawa," vol. 23, no. 2, pp. 536–542, 2014.
- [36] E. H. Aghezzaf, M. A. Jamali, and D. Ait-Kadi, "An integrated production and preventive maintenance planning model," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 181, no. 2, pp. 679–685, 2007.
- [37] R. V. Canfield, "Cost Optimization of Periodic Preventive Maintenance," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 35, no. 1, pp. 78–81, 1986.
- [38] Y. H. Lie, Chang Hoon; Chun, "An Algorithm for Preventive Maintenance Policy," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 35, no. 1, pp. 71–75, 1986.
- [39] M. C. Carnero, "An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 91, no. 8, pp. 945–963, 2006.
- [40] M. C. Carnero Moya, "The control of the setting up of a predictive maintenance programme using a system of indicators," *Omega*, vol. 32, no. 1, pp. 57–75, 2004.
- [41] L. Wang, J. Chu, and J. Wu, "Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 107, no. 1, pp. 151–163, 2007.
- [42] R. Ahmad and S. Kamaruddin, "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 135–149, 2012.
- [43] "Time-Based Maintenance (TBM) Planning | Fiix." [Online]. Available: <https://www.fiixsoftware.com/time-based-maintenance/>. [Accessed: 13-Feb-2018].
- [44] B. a Ellis, "Condition Based Maintenance," *Consult. Exec. Dir. Jethro Proj. (TJP)*, pp. 1–5, 2008.
- [45] D. Raheja, J. Llinas, R. Nagi, and C. Romanowski, "Data fusion/data mining-based architecture for condition-based maintenance," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 44, no. 14, pp. 2869–2887, 2006.
- [46] S. Nowlan, F and F. Heap, Howard, "Reliability-Centred Maintenance," p. 476, 1978.
- [47] R. T. Anderson, *Reliability -Centered Maintenance : Management and Engineering Methods*. 1990.
- [48] "Reliability-Centred-Maintenance.pdf." 1997.
- [49] F. T. S. Chan, H. C. W. Lau, R. W. L. Ip, H. K. Chan, and S. Kong, "Implementation of total productive maintenance: A case study," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 95, no. 1, pp. 71–94, 2005.
- [50] F. Wang and F. Wang, "Total Quality Management & Business Evaluating the efficiency of implementing total productive maintenance Evaluating the Efficiency of

- Implementing Total Productive Maintenance,” no. June 2013, pp. 37–41, 2007.
- [51] A. Gosavi, “A risk-sensitive approach to total productive maintenance,” *Automatica*, vol. 42, no. 8, pp. 1321–1330, 2006.
- [52] S. A. Brah and W. K. Chong, “Relationship between total productive maintenance and performance,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42, no. 12, pp. 2383–2401, 2004.
- [53] S. Borris, *Total Productive Maintenance*. 2006.
- [54] R. P. Y. Mehairjan, *Risk-Based Maintenance for Electricity Network Organizations*. 2017.
- [55] N. S. Arunraj and J. Maiti, “Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming,” *Saf. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 238–247, 2010.
- [56] Z. Tan, J. Li, Z. Wu, J. Zheng, and W. He, “An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection,” *Saf. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 852–860, 2011.
- [57] E. S. H. Hou, N. Ansari, and H. Ren, “A Genetic Algorithm for Multiprocessor Scheduling,” vol. 5, no. 2, 1994.
- [58] M. Cerrada, G. Zurita, D. Cabrera, R. Sánchez, M. Artés, and C. Li, “Fault diagnosis in spur gears based on genetic algorithm and random forest,” *Mech. Syst. Signal Process.*, pp. 1–17, 2015.
- [59] U. Maulik and S. Bandyopadhyay, “Genetic algorithm-based clustering technique,” vol. 33, 2000.
- [60] G. R. Harik, F. G. Lobo, and D. E. Goldberg, “The Compact Genetic Algorithm,” vol. 3, no. 4, pp. 287–297, 1999.
- [61] D. Whitley, “A genetic algorithm tutorial,” 1994.
- [62] P. Street, “A genetic algorithm for flowshop sequencing,” vol. 22, no. 1, pp. 5–13, 1995.
- [63] L. Blass and M. C. Correia, “ANÁLISE DO DESEMPENHO DO TRANSPORTE AÉREO USANDO O MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS Resumo : A importância de usar metodologias e ferramentas de caráter multidisciplinar que possibilitam a análise deste indicador de capacidade produtiva está neste trabalho rel,” pp. 6–11, 2018.
- [64] Z. Eryan, “Applied Research on Signal Processing Deducing by Method of Completing the Squares of Least Square Estimation,” pp. 796–799, 2015.
- [65] A. B. Graça, “Problemas de Mínimos Quadrados : Resolução e Aplicações,” 2016.
- [66] A. W. Labib, “A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS,” *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 191–202, 2004.
- [67] M. Braglia, G. Carmignani, M. Frosolini, and A. Grassi, “AHP-based evaluation of CMMS software,” *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 17, no. 5, pp. 585–602, 2006.
- [68] S. E. Ehinger, “A Simple Computer-Based Maintenance System that Works,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 3, pp. 528–531, 1984.
- [69] M. Crain, “The Role of CMMS,” *Ind. Technol. North. Digit.*, pp. 1–6, 2003.
- [70] R. Söderberg, K. Wärmefjord, J. S. Carlson, and L. Lindkvist, “Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 1, pp. 137–140, 2017.
- [71] T. O’Hanlon, “Computerized Maintenance Management and Enterprise Asset Management Best Practices.”

## Capítulo: Bibliografía

---

- [72] F. Kamoun, "Toward best maintenance practices in communications network management," *Int. J. Netw. Manag.*, vol. 15, no. 5, pp. 321–334, 2005.
- [73] S. Garg, A. Puliafito, M. Telek, and K. Trivedi, "Analysis of preventive maintenance in transactions based software systems," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 47, no. 1, pp. 96–107, 1998.
- [74] "Preparing for AI with predictive maintenance - Information Age," 2017. [Online]. Available: <http://www.information-age.com/preparing-ai-predictive-maintenance-123467203/>. [Accessed: 03-Mar-2018].



## Funcionamento do MDS

Este capítulo tem como objetivo explicar a utilidade do MDS não só como ferramenta que obtém a estratégia com custo mínimo.

Inicialmente é através do MDS que se escolhe o modo em que irá operar o *software*. Isto é definido pelos três botões no canto inferior esquerdo na Figura 7.1.

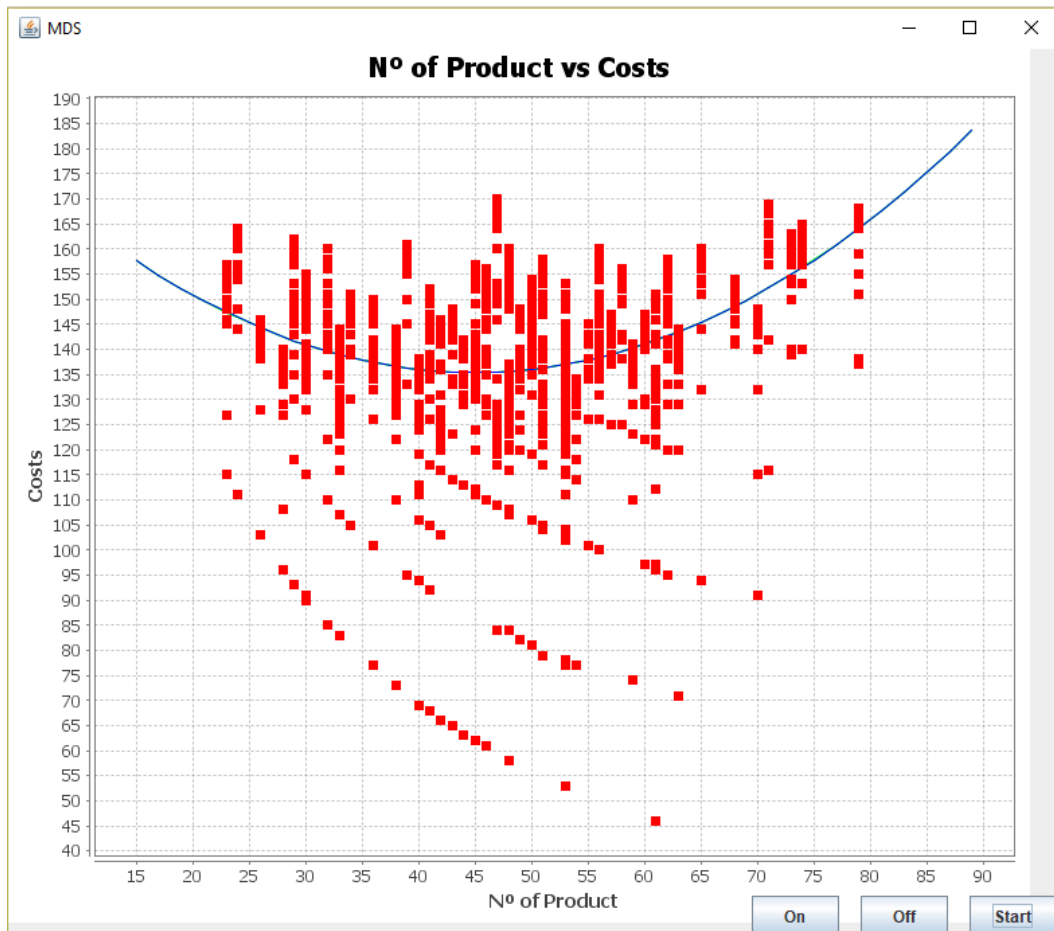


Figura 7.1 - Resultado final da aplicação do MDS.

O Simulador pode ser operado pelo MDS ou pode ser utilizado para a realização de testes sendo independente. Esta opção é definida no ecrã da Ferramenta de Apoio à Decisão.

Os botões de “ON” e “OFF” são utilizados para definir o modo operante e o “START” ativa o modo escolhido. “ON” é a opção que indica que o MDS está a ser utilizado. “OFF”, contrariamente, indica que o Simulador está independente e por isso é necessária definir alguma estratégia de manutenção para que fique ativo.

Ao longo do tempo são representados vinte ciclos de tempo por cada estratégia e são aplicadas 320 estratégias.

Quanto mais pontos são representados no gráfico, menor fica a margem de erro, como se pode verificar na Figura 7.1 que não se visualiza a linha verde.

## Funcionamento do Simulador

Neste capítulo são descritas algumas características do Simulador com um mais detalhe, utilizando um exemplo concreto para o efeito. Foi testado a estratégia adquirida a partir do MDS com dispersão de 10%.

Todos os ecrãs funcionam independentemente do modo em que o MDS está a operar.

### A1. Ecrã “Generic”

O ecrã principal do Simulador pode ser repartido em quatro partes: visualização das máquinas, botões de comando, controlo de parâmetros e definição da estratégia a testar.

Na Figura 7.2 pode-se observar as 16 máquinas em funcionamento. Devido à dispersão, pode-se verificar que se encontram em fases diferentes, algumas estão em manutenção outras ativas e ainda uma em reparação.

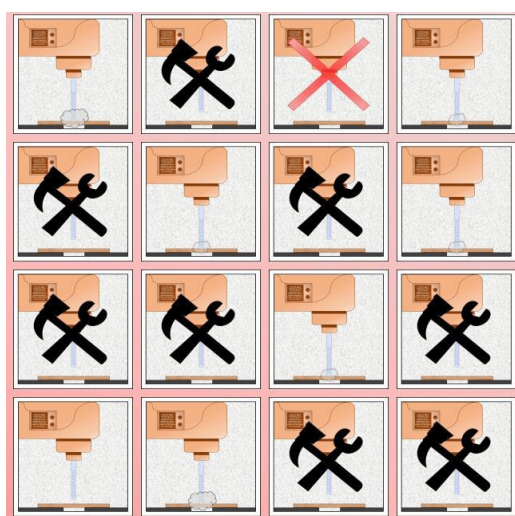


Figura 7.2 - Visualização das máquinas no ecrã "Generic".

A segunda divisão tem quatro opções de controlo sobre as máquinas:

- Ligar;
- Desligar;
- Reparar;
- Manutenção.

Estas ações influenciam todos os equipamentos simultaneamente independentemente da fase em que eles se encontram.

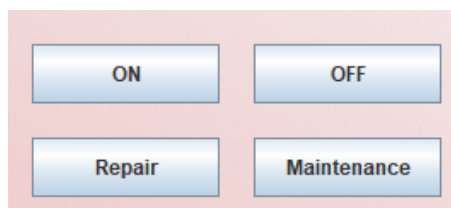


Figura 7.3 - Botões de controlo no ecrã "Generic".

Para poder acelerar o tempo de simulação foi criado um *Spinner* que controla isso mesmo.

Também com um *Spinner* é controlada a dispersão a efetuar sobre a variação das constantes associadas às máquinas.

Após a alteração da dispersão terá de se clicar o botão "*Generate Dispersion*" para garantir a introdução do ruído nos equipamentos.

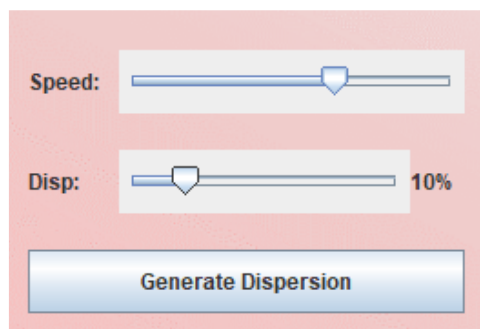


Figura 7.4 - Controlo de parâmetro no ecrã "Generic".

Por último, foram adicionados três botões para controlar qual a estratégia a aplicar e para isso foram criados três botões:

- *Run-To-Failure*;
- *Condition-Schedule*, que equivale a Manutenção baseada em Condições;
- *Best Strategy*, que é a obtida pelo MDS.
- Estes botões influenciam todos os equipamentos e só podem ser alterados quando o Simulador estiver ativo no modo de testes.

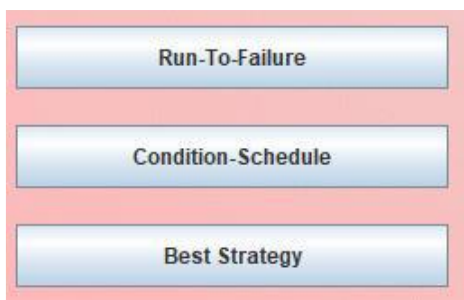


Figura 7.5 - Botões de estratégias no ecrã "Generic".

## A2. Ecrã "Parameters"

Este ecrã reflete a velocidade de cada equipamento e a estratégia em que cada um está a operar, individualmente.

Ao realizar os testes, estes dois parâmetros podem ser modificados e, consequentemente, as máquinas sofrem alterações no seu funcionamento.

Como se pode visualizar na Figura 7.6, este ecrã contém os parâmetros referentes a cada máquina na mesma posição da máquina no ecrã "Generic", assim é mais fácil para acertar um equipamento concreto.

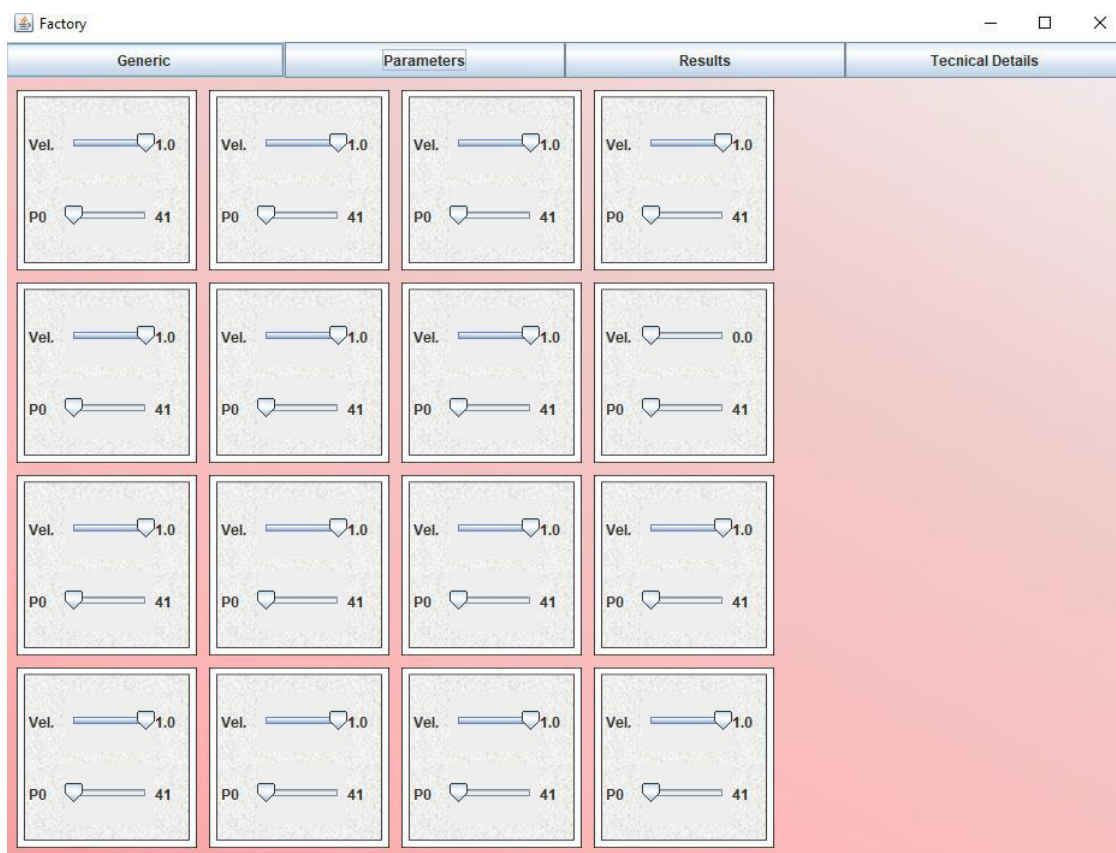


Figura 7.6 - Ecrã "Parameters".

### A3. Ecrã “Results”

Para a visualização dos campos em estudo foi criado o ecrã de “Results”. As variáveis representadas são o número de produtos, que é utilizado como condição para as estratégias Manutenção baseada em Condições e no MDS, e os custos que são o resultado que é sempre necessário verificar.

Comparativamente ao ecrã anterior, este também contém os resultados organizados por máquina.

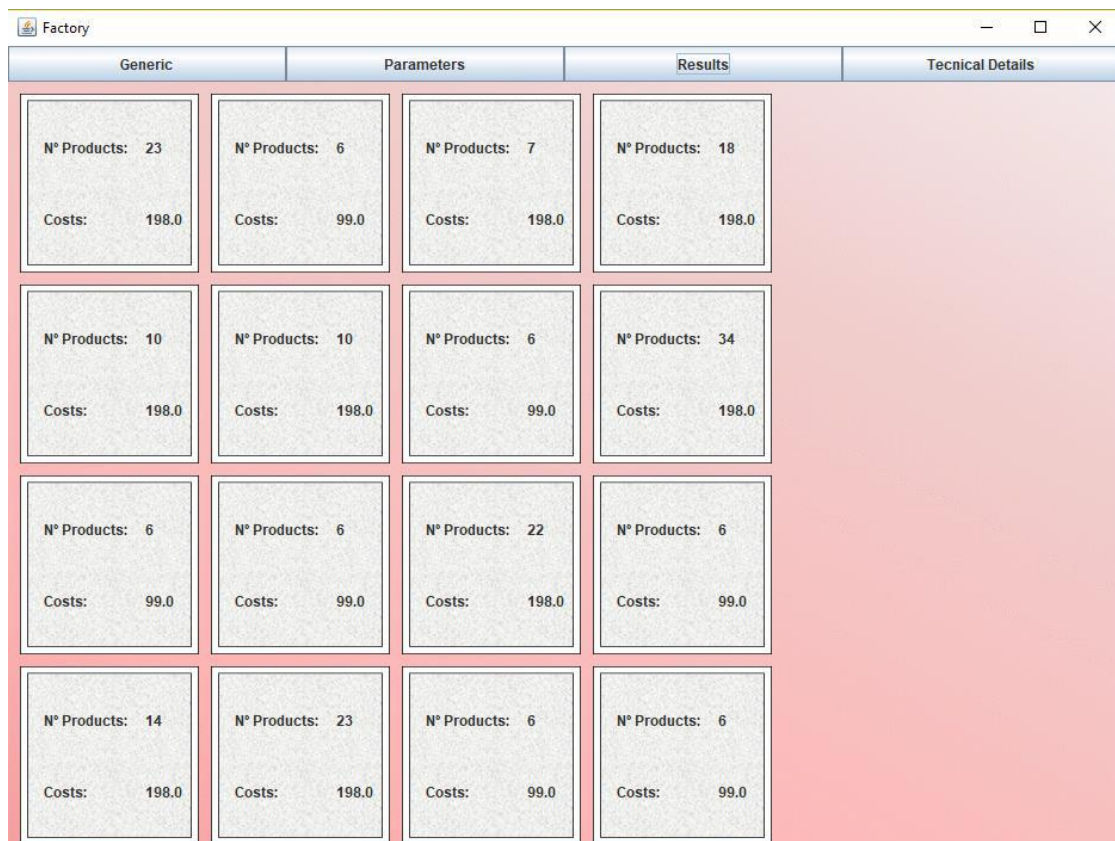


Figura 7.7 - Ecrã "Results".

### A4. Ecrã “Tecnical Details”

Por último, é oportuno apresentar, em tempo real, as manutenções e reparações realizadas em cada máquina. O ecrã exibido na Figura 7.8 é a representação disso mesmo.

Os dados apresentados são:

- Número de reparações ao Motor;
- Número de reparações à Broca;
- Número de manutenções à Broca.

## Apêndice: Funcionamento do Simulador

Sempre que existir dispersão podem ser visualizados detalhes diferentes entre máquinas

No final dos testes, estes dados podem ser uteis para compreender em que se baseiam os custos resultantes, uma vez que os custos são fixos.

Generic	Parameters	Results	Tecnical Details
Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 0 Drill: 0 Maint.: 100	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99
Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99
Machine: 0 Drill: 0 Maint.: 100	Machine: 0 Drill: 0 Maint.: 100	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 0 Drill: 0 Maint.: 100
Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 1 Drill: 0 Maint.: 99	Machine: 0 Drill: 0 Maint.: 100	Machine: 0 Drill: 0 Maint.: 100

Figura 7.8 - Ecrã "Tecnical Details".