FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Análise e Otimização da Taxa de Ocupação de Equipamentos Numa Linha de Produção de Segmentos para Motores Automóveis

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Autor

Alberto Gabriel da Silva Marques

Orientadores

Professor Doutor Cristóvão Silva

Júri

Presidente	**Professor Doutor José Luís Ferreira Afonso** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**
Vogal	**Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto** **Professor Assistente Convidado da Universidade de Coimbra**

Colaboração Institucional

MAHLE
Driven by performance

MAHLE Componentes de Motores, S. A.

Coimbra, Setembro, 2013

“Nem tudo o que pode ser contado conta, e
nem tudo o que conta pode ser contado.”

Albert Einstein

“*If you can’t describe what you are doing as a process,*
you don’t know what you’re doing.”

W. Edwards Deming

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento:

À MAHLE por me ter acolhido e dado esta oportunidade de estágio e pela formação que me proporcionou a nível pessoal, académico e profissional. Um agradecimento especial ao Departamento de Engenharia por me ter acolhido de "braços abertos" e pelo apoio prestado ao longo do estágio. Ainda um agradecimento ao restante grupo de estagiários Ana Rita, Daniela, Gonçalo, João e Isabel pelos bons momentos passados.

Aos meus orientadores Professor Doutor Cristóvão Silva, e Engenheiro Ricardo Reis, pelos conhecimentos transmitidos e apoio na realização do trabalho e do estágio.

Aos meus pais, pelo apoio e esforço que fizeram para me proporcionar esta oportunidade. E à restante família pela amizade e orgulho que têm demonstrado.

Ao meu primo Hélder e ao meu amigo João Borras, pelo apoio, amizade e companheirismo incondicional que têm demonstrado ao longo da minha vida.

À família do VP 123, Joana, António, André, Catarina, Ribas e restantes penetras que por lá passaram, pela amizade e por me terem proporcionado um ano difícil de igualar.

Como não poderia deixar de ser, aos meus colegas e amigos da Universidade de Aveiro, em especial ao Vítor, à Sofia e à Rute pela amizade incondicional, pelos bons momentos passados e pelo apoio nos menos bons.

Por fim aos meus colegas e amigos da Universidade de Coimbra por me terem proporcionado dois anos inesquecíveis.

A todos um MUITO OBRIGADO!!

Resumo

Este trabalho teve como objectivo o estudo das produtividades e ocupações das lavadoras da unidade fabril da MAHLE. Após análise das mesmas, com o objectivo de as optimizar, procedeu-se à simulação do efeito da compra de uma nova lavadora, nas ocupações das restantes.

Numa segunda fase, desenvolveu-se um modelo matemático em programação linear. Este modelo procura caracterizar o problema, e permitir, de forma simples, o estudo de diferentes *layouts* para a distribuição das lavadoras. O modelo desenvolvido tem como objectivo minimizar a distância total percorrida pelos produtos para efectuar operações de lavagem. Aplicou-se o modelo a três diferentes cenários, dois dos quais consideram uma organização das lavadoras em células, e estudou-se o efeito da sua implementação nas ocupações. Concluiu-se que os cenários que consideram uma organização celular das lavadoras optimizam o balanceamento das ocupações das mesmas. No entanto, a distância total percorrida pelos anéis duplica, quando comparados ao cenário idêntico ao actual.

Palavras-chave: Optimização, Produtividade, Ocupação de Equipamentos, Programação Linear, *Layout*.

Abstract

The study of productivity and occupancy of cleaning equipments at MAHLE is the object of this paper. With the purpose of optimizing their use an analysis was run, followed by a simulation on how the purchase of a new machine would impact on cleaning equipments occupancy.

On a second stage, a linear programming mathematical model was developed. This model tries to describe the problem, and allow a straightforward study of different layouts in the distribution of cleaning machines. The developed model has the purpose to minimize the distance that products travel in order to get cleaned. The model was applied to three different scenarios and the effect of its implementation on occupancy was analysed. Two of these scenarios take into account a cell based organization of the cleaning machines. It was concluded that the scenarios which consider a cell based organization of cleaning machines optimize their occupancy level. Nevertheless, the distance that the piston rings have to travel doubles when compared to the present scenario.

Keywords Optimization, Productivity, Equipment Occupancy, Linear Programming, Layout

Índice

Índice de Figuras xi
Índice de Tabelas xiii
Simbologia xv
1. INTRODUÇÃO 1
2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 5
3. ENQUADRAMENTO AO PROBLEMA 7
3.1. O Grupo MAHLE 7
3.1.1. MAHLE Componentes de Motores, S.A. 9
3.2. Anéis de Pistão 10
3.3. Processo Produtivo e Operações de Lavagem 14
4. ANÁLISE DA OCUPAÇÃO DAS LAVADORAS 17
4.1. Metodologia e Método 17
4.1.1. Cálculo de Produtividades e Ocupação de Equipamentos 18
4.2. Dados Obtidos 19
4.3. Produtividades e Ocupação das Lavadoras 22
4.4. Projecto de Compra da Nova Lavadora 26
5. METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE *LAYOUTS* ALTERNATIVOS 29
5.1. Formulação Matemática do Problema 30
5.2. Simulação e Resultados 33
5.2.1. CENÁRIO A 34
5.2.2. CENÁRIO B 35
5.2.3. CENÁRIO C 36
6. CONCLUSÕES 39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41
ANEXO A 43
ANEXO B 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Evolução do número de trabalhadores e das vendas no Grupo MAHLE nos últimos 5 anos (MAHLE Group, 2013)..... 8

Figura 3.2. Sequência de operações de um motor de quatro tempos a gasolina (HowStuffWorks, 2012)..... 11

Figura 3.3. Pistão em corte com pormenor dos anéis de pistão. 12

Figura 3.4. Anéis de pistão: anel de óleo, anel raspador e anel de compressão. 13

Figura 3.5. *Layout* fabril da unidade industrial da MAHLE Murtede..... 14

Figura 3.6. Lavadora e pormenor do cesto onde são colocados os anéis. 15

Figura 3.7. Lavadora de tanques de processo contínuo (á esquerda) e lavadora de aspersão de processo descontínuo (à direita). 16

Figura 4.1. Calendarização das diferentes tarefas realizadas ao longo do estágio. 17

Figura 4.2. Processo de lavagem contínuo (LAV-27) e descontínuo (LAV-16)..... 21

Figura 4.3. Variação da produtividade em função da altura do anel. 23

Figura 4.4. Variação da produtividade em função do número de lavagens..... 24

Figura 4.5. Ocupação prevista das lavadoras para os anos 2013 e 2014, para a distribuição actual. 25

Figura 4.6. Ocupação prevista das lavadoras para os anos 2013 e 2014, para o cenário 1. 27

Figura 4.7. Ocupação prevista das lavadoras para os anos 2013 e 2014, para o cenário 2. 27

Figura 5.1. Ocupação das lavadoras – CENÁRIO A. 34

Figura 5.2. Ocupação das células de lavagem – CENÁRIO B..... 36

Figura 5.3. Ocupação das células de lavagem – CENÁRIO C..... 37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Tempos de ciclo de lavagem e quantidades lavadas por ciclo (valores médios). 20
Tabela 4.2. Localização e número de lavagens que cada anel realiza ao longo do seu processo produtivo. 22
Tabela 4.3. Previsão da ocupação das lavadoras nos anos 2013 e 2014 para o layout actual. 24
Tabela 4.4. Principais alterações na distribuição das lavadoras. 26
Tabela 5.1. Procura relativa ao ano 2013, por tipo de anel. 33
Tabela 5.2. Produtividades médias das lavadoras. 33
Tabela 5.3. Matriz distribuição da produção – CENÁRIO A. 34
Tabela 5.4. Matriz distribuição da produção – CENÁRIO B. 35
Tabela 5.5. Matriz distribuição da produção – CENÁRIO C. 37

SIMBOLOGIA

a – número da sublinha

i – número da operação que origina lavagem

j – número da lavadora ou célula de lavagem

k – número do produto

m – número total de lavadoras ou células de lavagem

m' – número total de lavadoras ou células de lavagem pertencentes a uma sublinha

o – número total de operações que originam lavagem

p – número total de produtos diferentes

$M = \{j, \ldots, m\}$ – conjunto das m lavadoras

$O = \{i, \ldots, o\}$ – conjunto das o operações que originam lavagens

$P = \{k, \ldots, p\}$ – conjunto dos p tipos de produtos a lavar

$SL_a = \{j, \ldots, m'\}$ – conjunto das m' lavadoras pertencentes à sublinha a

V_k – procura relativa ao produto k

R_j – produtividade da lavadora j

N_{ik} – número de operações i que o produto k realiza

D_{ij} – distância entre a operação i e a lavadora j

V_i – procura pela operação i

V_{ik} – procura da operação i relativa ao produto k

Q_{ij} – distribuição da procura das operações i pelas lavadoras j

$Dist$ – distância total percorrida para produzir todos os produtos

Z – função objectivo

W_j – ocupação da lavadora j

1. INTRODUÇÃO

A globalização e o presente cenário técnico-económico do mundo actual, enfatiza a competitividade na manufactura. De forma a combater o êxodo da procura dos clientes para países de mão-de-obra barata, as organizações industriais dos países mais industrializados, procuram agilizar as actividades de produção e alcançar o máximo aproveitamento dos seus recursos para aumentar a sua competitividade. Neste sentido, medir o desempenho de uma fábrica torna-se crucial para as organizações.

O presente trabalho é o culminar de um período de estágio realizado na MAHLE Componentes de Motores S.A., que incidiu no estudo de produtividades e ocupações das lavadoras da sua unidade fabril. Tendo-se verificado que as ocupações de algumas lavadoras se aproximavam de valores críticos, procedeu-se ao estudo do efeito da compra de uma nova máquina nas ocupações das restantes. Posteriormente desenvolveu-se um modelo em programação linear que permite, de forma simples, estudar a aplicação de diferentes *layouts* para a distribuição das lavadoras. Este modelo tem como função objectivo, minimizar as distâncias percorridas pelos produtos, para efectuar as lavagens, durante o seu processo produtivo. Três diferentes cenários foram simulados, tendo-se analisado o seu impacto nas distâncias percorridas e nas ocupações das lavadoras.

O desempenho de uma fábrica é geralmente medido pelo tempo ciclo, produtividade, OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) de equipamentos essenciais, rendimento, etc. (Ham & Fowler, 2007). Factores como avarias de equipamentos, programação inadequada, problemas no processo e falta de mão-de-obra, são frequentemente causadores de desequilíbrios de linha e o principal obstáculo para a obtenção de um bom desempenho (Ham & Fowler, 2007).

A eficácia global do equipamento (OEE) é uma métrica quantitativa que permite medir a produtividade individual dos equipamentos numa fábrica, sendo considerado por muitos como uma métrica fundamental para a gestão de operações *Lean* (Hill, 2012). A OEE identifica e mede as perdas de aspectos importantes como a disponibilidade, o desempenho e a taxa de qualidade, e foi introduzido na indústria pelo

conceito de Manutenção Produtiva Total (TPM) na década de 1980 (Muchiri & Pintelon, 2008).

A produtividade é uma medida de quão bem uma indústria, unidade de negócio, pessoa, ou máquina está a utilizar os seus recursos (Hill, 2012). É normalmente definida e medida como a quantidade de *outputs* produzidos dividida pela quantidade de *inputs* usados(Martinich, 1997). Conceitualmente pode ser fácil de compreender, no entanto, a um nível prático, medir e comparar produtividades pode apresentar problemas, (p.e., pode ser difícil de combinar vários *inputs* e *outputs* em unidades de medida comuns; comparar a produtividade de sistemas que fazem produtos semelhantes de qualidade diferente, etc.) (Martinich, 1997).

Utilização da capacidade ou ocupação de um equipamento é definida como a razão entre o tempo de trabalho efectivo necessário para produzir um recurso e o tempo disponível do equipamento. Este é um conceito fundamental na gestão de operações e gestão da capacidade. Maximizar a produtividade, maximizando a ocupação para amortizar os custos fixos por grandes quantidades produzidas, não é uma boa estratégia, porque uma alta ocupação dos equipamentos também pode significar elevados stocks, longos tempos de espera do cliente e mau serviço ao cliente (Hill, 2012). Em 2000, Potts e Whitehead demonstraram que maximizar a taxa de transferência é o equivalente a balancear a ocupação dos equipamentos do sistema (Potts & Whitehead, 2000). A ocupação actual de equipamentos é igualmente importante no planeamento da capacidade produtiva. A flutuação da procura cria problemas em relação à obtenção de recursos para atender às pretensões do cliente. As decisões de capacidade são de natureza estratégica e devem ser tomadas tendo em mente o crescimento futuro e planos de expansão, tendências de mercado, previsão de vendas, etc. (Kumar & Suresh, 2008).

Os avanços na área da investigação operacional em engenharia e das tecnologias informáticas têm expandido o uso, por parte dos *decision makers*, de ferramentas analíticas de tomada de decisão, tendo-se largamente difundido o uso de modelos matemáticos. “Um modelo é uma representação da realidade, que capta as características essenciais de um objecto, sistema ou problema sem ser perturbado por detalhes sem importância” (Martinich, 1997). Muitos dos problemas na gestão de operações podem ser descritos segundo um modelo de programação linear.

A programação linear fornece métodos que permitem encontrar a melhor solução de forma relativamente fácil, tendo-se tornado especialmente popular, uma vez que muitos problemas reais conseguem satisfazer os pressupostos dos modelos (Martinich, 1997). A formulação de um modelo matemático de programação linear é constituída por um conjunto de variáveis de decisão, uma função objectivo e um conjunto de restrições. As variáveis de decisão são grandezas físicas que podem assumir qualquer valor de um conjunto de valores possíveis. Estas são controladas pelo *decision maker* com o objectivo de encontrar os melhores valores que constituem a tomada de decisão ou a resolução do problema. A função objectivo define os critérios para avaliar se a solução é boa ou má. Por sua vez, "as restrições são um conjunto de igualdades ou desigualdades funcionais que representam restrições físicas, económicas, tecnológicas, legais, éticas, etc., sobre que valores numéricos podem ser atribuídos às variáveis de decisão" (Martinich, 1997). O conjunto de soluções que satisfaçam as restrições é designado por soluções admissíveis. A solução será óptima admissível se optimizar a função objectivo (Estêvão, 1998).

A programação linear tem aplicação prática em inúmeros problemas, dos quais se destacam tipicamente o problema da mistura, o problema de transporte, o problema de decisão da produção e o problema de sequênciamento da produção (Estêvão, 1998). No entanto, muitos investigadores têm criado modelos mais ou menos complexos que procuram solucionar problemas reais da gestão industrial. No campo do estudo de problemas de *layout* de células, Chan et al., desenvolveram uma abordagem de duas etapas, primeiro, identificando as células de máquinas e as famílias de produtos, e segundo, normalizando a abordagem do estudo e formação de células considerando a sequência de uso das máquinas e minimizando a distância do movimento entre células (Chan, et al., 2005). Por sua vez, Nearchou desenvolveu um novo método baseado na optimização por enxame de partículas para resolver o problema de balanceamento de linhas de montagem simples. Este método considera a optimização de duas funções objectivo: maximizar a velocidade de produção da linha e maximizar o balanceamento da ocupação (Nearchou, 2010). Também Potts e Whitehead haviam estudado o balanceamento das cargas de trabalho e o *layout* em sistemas de manufactura flexíveis, desenvolvendo um algoritmo que, em três fases, maximiza a taxa de transferência (optimiza o balanceamento dos equipamentos) e minimiza o movimento do trabalho entre as máquinas (Potts &

Whitehead, 2000). Cossari et al, por sua vez optaram por balancear a ocupação minimizando a soma normalizada do quadrado dos desvios de carga (Cossari, et al, 2011).

Neste trabalho, desenvolve-se um modelo de programação linear que procura estudar o impacto da implementação de diferentes cenários de *layout* nas ocupações dos equipamentos. Este tem como função objectivo a minimização das distâncias percorridas pelos produtos durante o seu processo produtivo.

O restante documento está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2, explica o problema e a importância da sua resolução; o Capítulo 3, faz um enquadramento ao problema, falando sobre a empresa, os produtos nela produzidos e o processo de fabrico; o Capítulo 4, desenvolve o trabalho realizado durante o estágio, analisando as produtividades e ocupações dos equipamentos em estudo; no Capítulo 5, desenvolve-se um modelo em programação linear para o estudo de diferentes *layouts* para as lavadoras, estudando-se três possíveis cenários; por último, são apresentadas algumas conclusões no Capítulo 6.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado no presente trabalho centra-se na optimização das ocupações das máquinas de lavar (lavadoras) em função da sua distribuição pelas sublinhas da unidade industrial da MAHLE Componentes de Motores, S.A., em Murtede – Cantanhede.

A MAHLE – Murtede (futuramente apenas MAHLE) produz única e exclusivamente anéis de pistão, estando a sua nave fabril dividida por oito sublinhas de produção. A divisão das sublinhas está feita tendo em conta factores como o tipo de anel produzido, a matéria-prima e a tecnologia (de anel e de processos).

A qualidade dos anéis produzidos está dependente, em parte, das lavagens realizadas ao longo do processo. Estas procuram minimizar problemas relativos à sujidade resultante dos processos aos quais os anéis são sujeitos. A programação das lavadoras e a escolha dos produtos de lavagem são definidos em função do tipo de lavagem a efectuar, satisfazendo as necessidades de lavagem de todos os anéis que nelas são lavados.

A distribuição das máquinas de lavar pelas sublinhas é feita de forma a minimizar a distância às operações que implicam a lavagem dos anéis. No entanto, uma mesma lavadora é, na maioria dos casos, partilhada por várias operações ou, até mesmo, várias sublinhas. Assim, a diversidade de anéis produzidos e de processos que implicam lavagem, assim como a impossibilidade de haver uma lavadora dedicada para cada conjunto anel-processo, impede que haja uma localização óptima para cada lavadora e leva a um desequilíbrio nas suas ocupações. Outro factor importante que leva ao desequilíbrio das ocupações das lavadoras é a exigência, por parte de alguns clientes, em que os anéis de pistão sejam produzidos em sublinhas independentes com um fluxo contínuo bem delineado, impedindo a partilha de lavadoras entre sublinhas. Todos estes factores de desequilíbrio levam a que haja sublinhas em que as suas lavadoras apresentem ocupações bastante baixas, contrastando com outras com ocupações demasiado elevadas. Está assim identificado o principal problema que o presente documento se propõem solucionar.

Ao longo do documento explorar-se-ão os problemas acima descritos. Começando com uma análise das ocupações actuais, estudar-se-á o impacto, nas

ocupações, da compra de uma nova lavadora, propondo-se uma nova distribuição das mesmas. Esta proposta procurará: (1) eliminar a partilha de lavadoras entre sublinhas e cumprir com as premissas de cumprir sempre que possível o fluxo continuo dos anéis ao longo das sublinhas; (2) optimizar a ocupação das lavadoras, colmatando problemas de falta de capacidade num futuro próximo; (3) optimizar as distâncias percorridas pelo anel entre a lavadora e as operações a montante e a jusante da lavagem.

Numa segunda parte, desenvolver-se-á uma metodologia que permitirá simular de forma simples e rápida a aplicação de *layouts* alternativos. Propondo três *layouts* diferentes, estudar-se-á o efeito da sua aplicação na distância total percorrida pelos anéis e nas ocupações dos equipamentos.

3. ENQUADRAMENTO AO PROBLEMA

No presente capítulo pretende-se fazer um enquadramento do leitor ao problema, apresentando a empresa a nível corporativo e tecnológico, desenvolvendo os principais aspectos relativos à tecnologia de anéis de pistão e ao processo produtivo e operações de lavagem.

3.1. O Grupo MAHLE

MAHLE é um grupo industrial alemão com 93 anos de existência. Dividido em duas unidades de negócio – *Engine Systems* e *Filtration and Engine Peripherals* – o Grupo MAHLE apresenta-se como um dos principais fornecedores mundiais da indústria automóvel, figurando no top 3 dos principais fornecedores mundiais de sistemas de pistão, componentes de cilindros e também comandos de válvulas e sistemas de gestão de ar e líquidos. Os seus clientes são quase todos os fabricantes de motores e automóveis (MAHLE Group, 2013).

Em 2012 o Grupo MAHLE empregava cerca de 48.000 pessoas nos seus centros de I&D e nas suas 100 unidades industriais distribuídas por todo o mundo, tendo apresentado um volume de vendas de quase 6,2 mil milhões de euros, posicionando-o no top 30 dos principais fornecedores mundiais da indústria automóvel. Na Figura 3.1 pode ver-se a evolução das vendas e do número de trabalhadores no grupo ao longo dos últimos 5 anos (MAHLE Group, 2013).

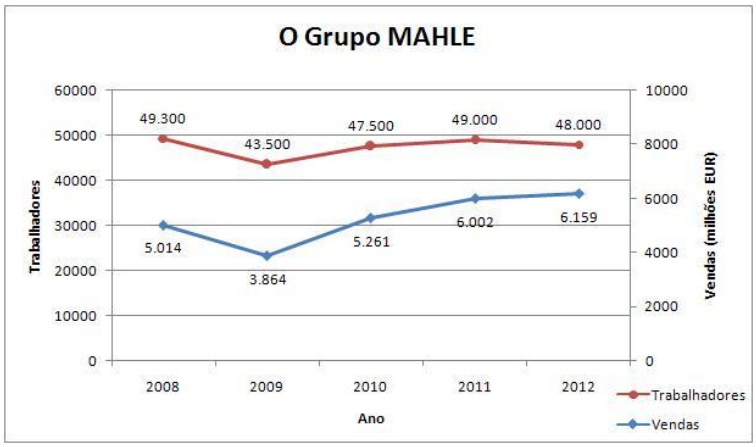


Figura 3.1. Evolução do número de trabalhadores e das vendas no Grupo MAHLE nos últimos 5 anos (MAHLE Group, 2013).

O Grupo possui sete centros de investigação e desenvolvimento espalhados por quatro continentes. Nestes, 2400 técnicos e engenheiros investigadores trabalham na pesquisa de novos e inovadores conceitos, produtos e sistemas de propulsão de veículos, garantindo um desenvolvimento constante. De modo a maximizar sinergias e a poupar recursos, a MAHLE promove uma "partilha activa de informação entre os seus centros de I&D", e "combina produtos e módulos que apresentam crescentes capacidades de sistematização com uma rede em expansão e aumento da padronização de todas as principais unidades da empresa", mantendo sempre elevados padrões de qualidade, que são aplicados e reforçados internacionalmente (MAHLE Group, 2013).

A MAHLE nasce em 1920, pelas mãos dos irmãos Hermann e Dr. Ernst Mahle, com o fabrico de pistões em ligas leves, e cresceu de uma pequena oficina de testes até à empresa global e líder em tecnologia que é hoje. Tirando grande partido do processo de globalização, e vendo-o como uma grande oportunidade, a MAHLE alicerça o seu crescimento, com a aquisição estratégica de empresas especializadas no fabrico de anéis de pistão, camisas de cilindro e bielas, passando de fabricante de componentes a fornecedor de sistemas completos (MAHLE Group, 2013).

O grupo procura continuar a reforçar a sua posição no mercado de componentes de cilindro, focando a sua actividade na investigação e desenvolvimento contínuo de soluções e materiais alternativos, que satisfaçam os elevados requisitos e performances dos motores actuais e futuros (MAHLE Group, 2013).

No inicio dos anos noventa o grupo introduziu nas suas unidades os princípios do sistema de Gestão pela Qualidade Total que, actualmente, conjugado com unidades de

produção optimizadas, servem de base ao sistema de gestão de qualidade do grupo. Sendo um fornecedor líder da indústria automóvel, todas as unidades MAHLE são certificadas de acordo com os padrões internacionais do sector, nomeadamente, segundo a norma de qualidade ISO TS 16949 (MAHLE Group, 2013).

Segundo a directiva "*Optimum fulfillment of costumer expectations*" (numa tradução livre: cumprimento óptimo das expectativas dos consumidores), o grupo incute nos seus colaboradores uma filosofia de "flexibilidade, consciencialização e responsabilidade individual em todas as fases de desenvolvimento e produção, de todos os projectos com fornecedores, clientes e parceiros". Por outro lado, seguindo o lema "*Together we can become even better*" (juntos podemos tornar-nos ainda melhores), a MAHLE procura incluir os seus fornecedores nas fases iniciais dos projectos, aderindo, juntamente com as unidades de produção a padrões de qualidade estritos (MAHLE Group, 2013).

Procurando um fornecimento aos clientes livre de erros, a MAHLE, com a sua "*zero error strategy*" (estratégia zero erros) incute na gestão de projectos a procura de erros durante as primeiras fases de desenvolvimento, prevenindo a necessidade de rectificação de defeitos. Provas da eficiência da sua estratégia de gestão da qualidade são os prémios de qualidade que a MAHLE regularmente recebe dos principais fabricantes de automóveis (MAHLE Group, 2013).

Em 1964 os irmãos Mahle, fundadores da empresa, transferiram a propriedade do grupo para uma fundação sem fins lucrativos, nascendo assim a MAHLE Foundation. A MAHLE Foundation possui e gere, desde então, quase todas as acções da empresa, dá suporte a causas de caridade e a instituições nas áreas da saúde, segurança infantil, educação, e apoiando projectos sociais e culturais (MAHLE Group, 2013).

3.1.1. MAHLE Componentes de Motores, S.A.

A MAHLE, Componentes de Motores, S.A., adquire esta denominação em 1999, após ser adquirida, em 1997, pelo grupo MAHLE. Fundada em 1990 com a denominação social de Cofapeuropa, iniciou a produção em 1993, tendo resultado de um investimento do grupo Brasileiro Cofap, aproveitando o Programa Específico de Desenvolvimento da Indústria Portuguesa para entrar no mercado europeu e, assim, facilitar a exportação para a Europa.

Com a sua integração no grupo MAHLE, a empresa passa a poder beneficiar das economias de escala ao nível dos processos produtivos e de I&D melhorando na relação qualidade/preço e aumentando, consequentemente, a sua competitividade. Assim como obteve a certificação referente à ISO 9001, à norma francesa QS-9000 e à norma alemã VDA 6.4, após melhorado o seu sistema de gestão da qualidade.

Após a integração no Grupo MAHLE, passou a produzir anéis de pistão para motores a diesel para veículos ligeiros e pesados, tendo feito, a partir de 2000, importantes investimentos na construção de instalações modernas para produzir anéis de pistão de crómio cerâmico, utilizados nos veículos ligeiros a diesel, e anéis de pistão de aço nitretado e PVD, utilizados nos veículos *heavy duty a diesel*.

No final do ano 2012, a MAHLE Murtede contava com 621 trabalhadores altamente qualificados que produzem anualmente cerca de 40.000.000 de anéis de pistão de ferro fundido e de aço para motores a gasolina e diesel para veículos ligeiros e pesados. Estes anéis são exportados para os diferentes continentes, contando com os principais fabricantes de automóveis a nível mundial como clientes

3.2. Anéis de Pistão

Como foi referido anteriormente, a MAHLE – Murtede, fabrica anéis de pistão (denominação proveniente do inglês *piston rings*), também conhecidos como segmentos de pistão (proveniente do francês *segments de piston*). Os anéis de pistão são um dos constituintes dos motores de combustão interna de movimento alternativo. Os motores de movimento alternativo podem ser divididos, segundo a sequência de operações, em duas categorias: motores de quatro tempos ou motores de dois tempos. Dentro dos motores de combustão interna existem ainda os motores de movimento rotativo, ou de Wankel, e os motores axiais – turbinas a gás e motores de avião.

Nos automóveis, os motores mais usados são os motores a 4 tempos a gasolina ou gasóleo. Na Figura 3.2 pode ver-se representada a sequência de operações de um motor de quatro tempos a gasolina. Estas operações têm por base um ciclo de quatro movimentos do pistão (Costa, et al, 2009):

1. **Admissão:** o pistão, em movimentos descendente, aspira a mistura ar-gasolina que entra pela válvula de admissão, que se encontra aberta;

2. **Compressão**: uma vez atingido o ponto morto inferior (PMI), a válvula de admissão fecha-se e o pistão inicia o movimento ascendente, comprimindo a mistura ar-gasolina presente na câmara de explosão, aumentando a pressão na mesma;
3. **Explosão-expansão**: imediatamente antes de o pistão atingir o ponto morto superior (PMS), dá-se a ignição da mistura, através de uma centelha lançada pela vela. A combustão da mistura provoca um aumento brusco da temperatura e da pressão, empurrando o pistão no sentido descendente;
4. **Escape**: antes de o pistão atingir novamente o PMI, abre-se a válvula de escape. O pistão inicia, novamente, o seu movimento ascendente expelindo, pela válvula de escape, os gases resultantes da combustão.

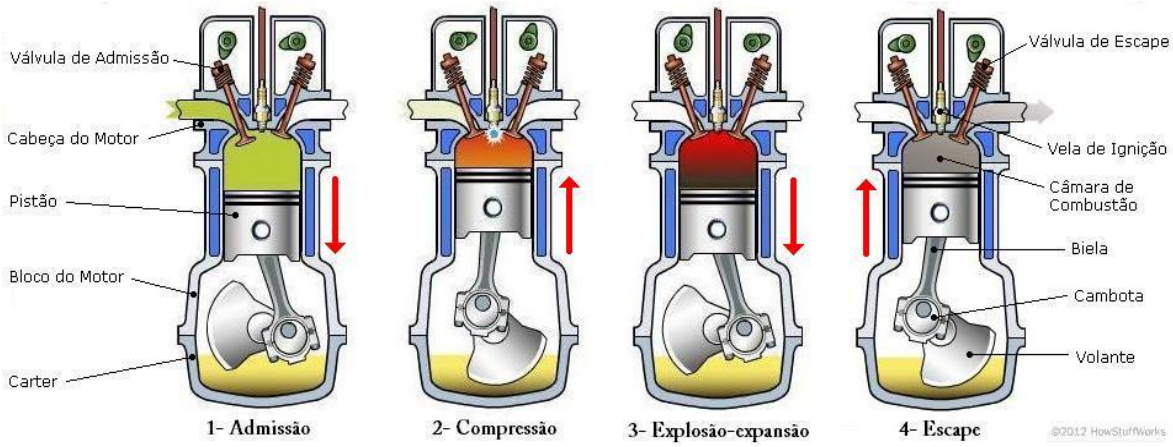


Figura 3.2. Sequência de operações de um motor de quatro tempos a gasolina (HowStuffWorks, 2012).

Os motores de quatro tempos a gasóleo, embora apresentem um ciclo de quatro movimentos idêntico, diferem em alguns aspectos dos motores a gasolina, nomeadamente: na **Admissão**, estes motores aspiram ar do exterior; na **Compressão**, o ar aspirado é comprimido na câmara de compressão, atingindo temperaturas na ordem dos 600ºC; na **Combustão-expansão**, o gasóleo é injectado na câmara de compressão, que, devido às elevadas temperaturas do ar, entra em combustão espontânea (sem necessidade de vela de ignição) impelindo o pistão no sentido descendente; no **Escape**, o pistão impele os gases resultantes da combustão pela válvula de escape, que se abre imediatamente antes de este atingir o PMI (Costa, et al., 2009). Nos motores de quatro tempos mono-cilíndricos, apenas

o terceiro (Explosão-expansão) é motor, sendo que os restantes realizam-se a partir da energia armazenada no volante do motor durante o terceiro tempo (Machado, 1993).

Neste sistema complexo, os anéis de pistão desempenham um papel crucial na eficiência do motor, cumprindo três funções principais: restringir fugas de gases da câmara de combustão para o cárter; controlar a lubrificação das paredes do cilindro e as perdas de óleo do cárter para a câmara de combustão; e facilitar o arrefecimento da cabeça do pistão transmitindo o calor para as paredes do cilindro (Machado, 1993) (Müller & Nau, 1998).

Nos motores convencionais há três anéis por cada pistão, tendo cada um funções diferentes. Os dois primeiros anéis são chamados de anéis de compressão e, o terceiro anel é designado por anel de óleo. Dentro dos anéis de compressão, o segundo anel também pode ser chamado de anel raspador. Seguidamente descreve-se as funções destes anéis.

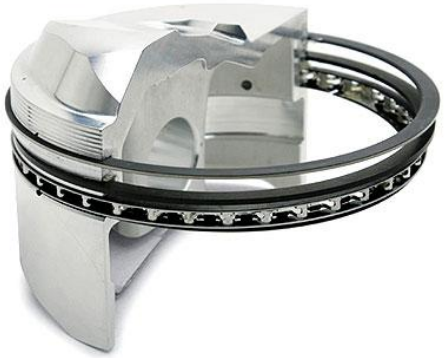


Figura 3.3. Pistão em corte com pormenor dos anéis de pistão.

O **Anel de Compressão** é o anel que se encontra mais próximo da câmara de combustão. Este anel tem como principal objectivo impedir a passagem de gases de combustão para o cárter através da folga entre o pistão e o cilindro. Esta função assume uma enorme importância, uma vez que a passagem de gases de combustão através deste anel (1) provoca a evaporação e queima do filme de óleo, resultando num aumento do desgaste e formação de coque; (2) reduz as perdas de rendimento do motor associadas às perdas de pressão na câmara de combustão; (3) reduz os custos com equipamento catalítico para o tratamento de gases de escape que se misturam com o óleo vaporizado, uma vez que as normas de poluição ambiental requerem o tratamento destes gases e o seu custo aumenta drasticamente com o aumento destas perdas (Machado, 1993) (Müller & Nau, 1998).

O segundo anel de compressão, vulgarmente conhecido como **Anel Raspador**, além de garantir um reforço no controlo das perdas de gases da câmara de combustão para

o cárter, tem como principal função o controlo da espessura do filme de óleo na parede do cilindro. Esta espessura não pode ser muito fina, para garantir uma lubrificação perfeita das faces de contacto entre anéis, pistão e cilindro, nem muito grossa, para não haver um consumo excessivo de óleo. Esta raspagem deve ocorrer apenas no curso descendente, e é conseguida conferindo ao anel um perfil com geometria diferente (face de contacto inclinada ou abaulada assimetricamente) do primeiro anel de compressão (face de contacto plana ou abaulada) (Machado, 1993) (Müller & Nau, 1998).

O terceiro e último anel é o **Anel de Óleo**. Tem como função controlar o fluxo de óleo que passa do cárter para a interface pistão-cilindro. Estes, necessitam de ter uma elevada pressão de contacto, geralmente conseguida recorrendo a uma mola auxiliar, para raspar o excesso de óleo que passa do cárter para as paredes. Também de forma a garantir a elevada pressão de contacto, estes anéis são maquinados com um canal central de modo a reduzir as faces de trabalho, concentrando toda a pressão proveniente do anel e das molas. Um tipo específico de anel de óleo, é o anel de múltiplas peças, que é geralmente constituído por dois segmentos de altura reduzida e por um expansor intermédio que actua como mola e garante do escoamento do óleo raspado da parede para o interior do pistão (Machado, 1993).

Figura 3.4. Anéis de pistão: anel de óleo, anel raspador e anel de compressão.

3.3. Processo Produtivo e Operações de Lavagem

A unidade fabril da MAHLE está dividida em oito sublinhas: Três Peças; UFLEX; Racing e Amostras; Comum; Ceramic Chrome; Hard Chrome; Otto/I-Shaped; Aço-PVD. A Figura 3.5 representa o *layout* fabril.

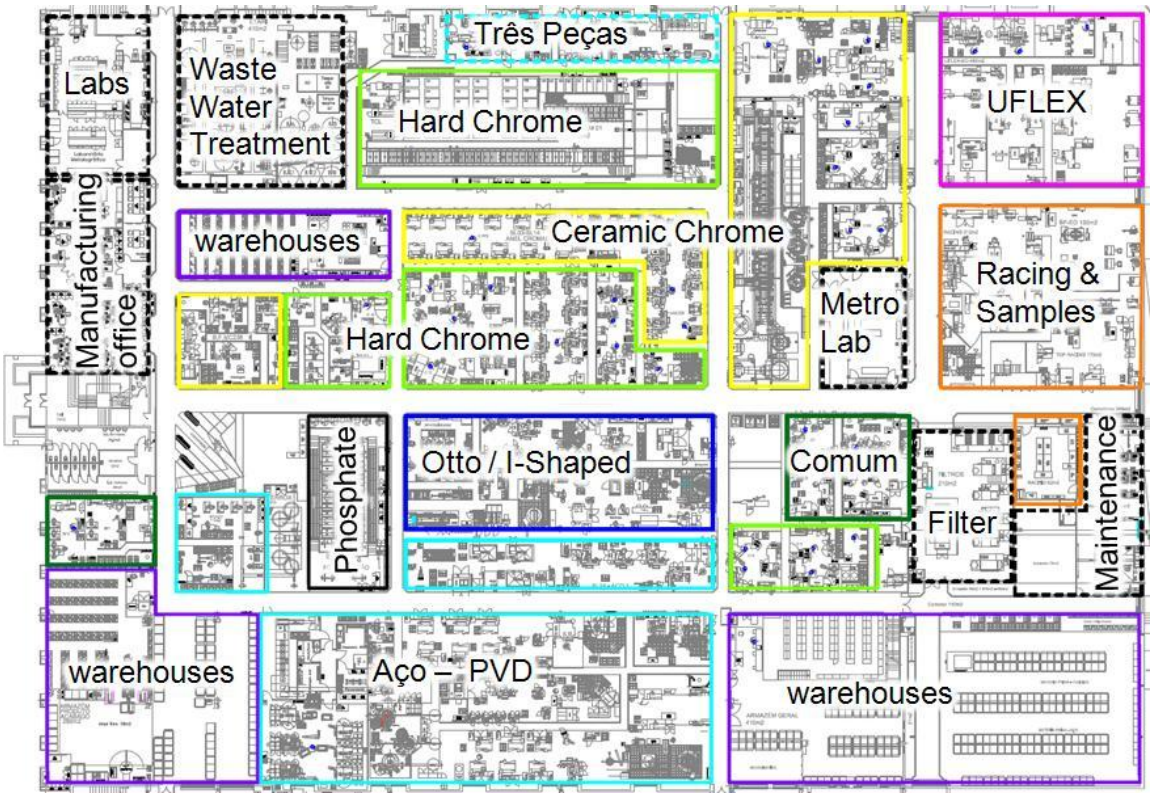


Figura 3.5. *Layout* fabril da unidade industrial da MAHLE Murtede.

A produção de um anel de pistão engloba processos de conformação metálica, processos de maquinação, tratamentos térmicos e de superfície, entre outros. Dadas as características de alguns processos, estes podem implicar a lavagem, prévia ou póstuma, dos anéis. Os processos que implicam uma lavagem prévia dos anéis são os processos de tratamento térmico e de superfície (p. e., o Alivio de Tensões, a Nitretação Gasosa, o PVD – *Physical Vapor Deposition*), servindo esta lavagem para limpar as superfícies do anel impedindo que qualquer impureza interfira no tratamento que a superfície vai sofrer. No que respeita aos processos que implicam lavagens a seguir à sua execução (p.e., a Rectificação Lateral, a Fresa de Fendas, o Bombeamento), estas devem-se aos produtos que são usados nos processos, como óleos de refrigeração ou abrasivos, induzindo assim a necessidade de lavagem dos anéis. Por sua vez, os produtos de lavagem conferem aos anéis uma protecção anticorrosiva.

Parâmetros como, o produto de lavagem, o tipo de lavagem (em tanque, por aspersão, por ultra-sons, etc.), o tempo dos ciclos de lavagem e secagem e a periodicidade de troca dos banhos das lavadoras são definidos tendo em conta as especificidades do anel (matéria-prima, família de anel, etc.) e o tipo de operação que implicou a necessidade da lavagem.

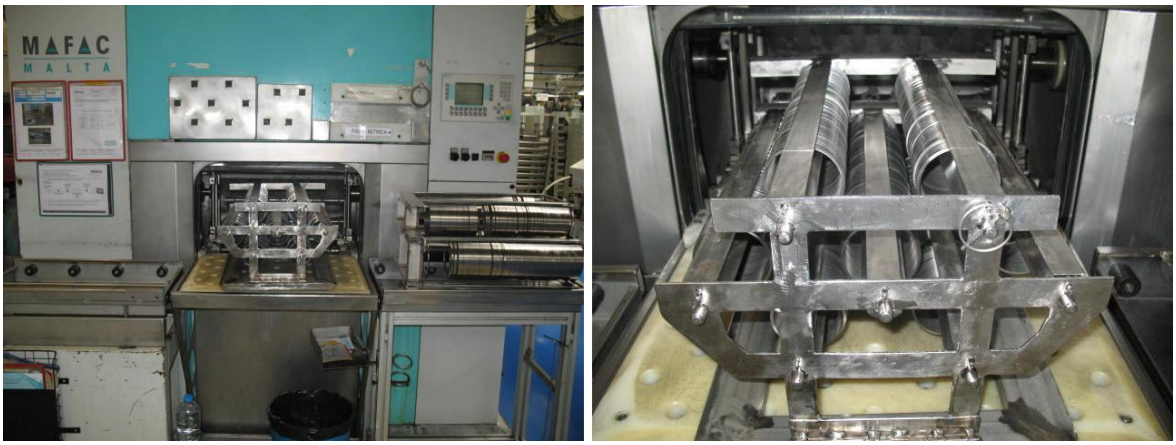


Figura 3.6. Lavadora e pormenor do cesto onde são colocados os anéis.

As lavadoras existentes na unidade fabril da MAHLE efectuam lavagens de dois tipos: lavagem por aspersão ou lavagem por submersão; e o seu processo pode ser contínuo ou descontínuo. O processo de lavagem ocorre em duas fases: a primeira fase, é a fase de lavagem propriamente dita; e a segunda fase é uma fase de secagem, uma vez que os anéis não podem permanecer húmidos, para não oxidarem. Numa lavadora de processo contínuo, são processados dois cestos de anéis simultaneamente, uma vez que enquanto o primeiro cesto a entrar na lavadora efectua o processo de secagem, o segundo entra para fazer a fase de lavagem.

Figura 3.7. Lavadora de tanques de processo contínuo (á esquerda) e lavadora de aspersão de processo descontínuo (à direita).

Diferentes produtos e métodos de limpeza são necessários para resolver diferentes problemas de limpeza na indústria. Os factores importantes na selecção de um método de limpeza são: (1) o contaminante a ser removido, (2) o grau de pureza necessário, (3) o material do substrato a ser limpo, (4) a finalidade da limpeza (5), os factores ambientais e de segurança, (6) o tamanho e geometria das peças, e (7) requisitos de custo de produção (Groover, 2010).

4. ANÁLISE DA OCUPAÇÃO DAS LAVADORAS

Ao longo deste capítulo explorar-se-á o trabalho desenvolvido durante o período de estágio na MAHLE, desde a recolha dos dados, ao cálculo de produtividades e ocupações das lavadoras e consequente análise dos resultados. Será também apresentado o estudo realizado para avaliar o impacto, nas ocupações dos equipamentos, da compra de uma nova lavadora que a empresa pretendia realizar.

4.1. Metodologia e Método

O estágio realizado na MAHLE pode ser dividido em três partes. Numa fase inicial, mais longa, procedeu-se ao levantamento dos dados em chão-de-fábrica. À recolha dos dados seguiu-se a sua análise, calculando-se as produtividades e a ocupação das máquinas. Por fim, tendo como objectivo fornecer dados de apoio à decisão de compra de uma nova lavadora, propôs-se dois cenários para uma nova distribuição das lavadoras pelas sublinhas, simulando-se o seu efeito nas ocupações das lavadoras.

Figura 4.1. Calendarização das diferentes tarefas realizadas ao longo do estágio.

Na fase do levantamento de dados, pretendia-se saber, para cada lavadora, a quantidade média de anéis lavados em cada ciclo de lavagem e os respectivos tempos de lavagem. Para isso procedeu-se à observação, contagem e cronometragem do processo junto de cada máquina, seguindo-se a calendarização apresentada na Figura 4.1. Na maioria das lavadoras a unidade de contagem foi a "vara", tendo-se posteriormente

convertido para número de anéis, dividindo o comprimento médio da vara pela altura do anel. Na cronometragem utilizou-se um cronómetro digital normal (hh:mm:ss.1/10s), tendo-se posteriormente convertido os tempos para minutos. Um outro levantamento importante feito durante esta fase foi apurar quais as operações que eram realizadas antes e após cada lavagem, de forma a se poder identificar as principais operações que implicam lavagem dos anéis, e associar operações a lavadoras. Pontualmente observou-se, também, se a qualidade da lavagem era satisfatória.

4.1.1. Cálculo de Produtividades e Ocupação de Equipamentos

A produtividade de uma lavadora define a quantidade de anéis (produto final) que esta tem capacidade para lavar por hora. É função do número de lavagens por hora (calculado dividindo a hora pelo tempo de ciclo de lavagem), do número de anéis lavados por hora (número de anéis por ciclo multiplicado pelo número de ciclos por hora) e do número de vezes, *N*, que cada anel lava, no equipamento em causa, ao longo de todo o seu processo produtivo. A empresa considera ainda, no cálculo das produtividades de todos os seus equipamentos, 20% de improdutividades que englobam desperdícios como problemas de fluxo, paragens para manutenção, paragens não programadas, etc.

$$Produtividade = \frac{(N.º\ de\ Lavagens\ por\ Hora)\times(N.º\ de\ Aneis\ por\ Lavagem)}{N} \times 0{,}8\ , \qquad (4.1)$$

A produtividade de qualquer lavadora varia consoante o tipo de anel que se está a lavar, uma vez que a quantidade de anéis por lavagem varia em função da altura do anel.

A ocupação dos equipamentos é calculada, na empresa, por uma aplicação desenvolvida em VBA (*Visual Basic for Applications*). Esta aplicação foi desenvolvida com o propósito de calcular as necessidades de máquinas para satisfazer uma determinada produção, num determinado período de tempo, servindo o seu *output* como suporte a planos de investimento futuros. Esta aplicação incorpora a esmagadora maioria dos equipamentos, e respectivas operações, utilizados no processo produtivo. No entanto, é possível filtrar os resultados por tipo de operação e por equipamento, obtendo-se assim o número de equipamentos necessários para produzir o número de anéis pretendidos durante o tempo simulado. No presente documento, chama-se Ocupação do Equipamento (neste caso das lavadoras) ao *output* da simulação para cada equipamento, transformado em

percentagem, p.e. se para a lavadora LAV-01 o resultado da simulação é 0,22, então a sua ocupação, para o plano de produção simulado, é de 22%.

A ocupação de um equipamento é determinada pelo quociente entre o tempo total necessário para produzir um determinado número de anéis e o tempo de laboração disponível durante o período simulado.

$$Ocupação = \frac{Tempo\ Total\ Necessário}{Tempo\ Disponível} \tag{4.2}$$

As simulações realizadas têm em conta o plano de produção para o período de um ano, ou seja, 270 dias. Sendo o tempo de produção diário de 22,5 horas (cada turno pára meia hora para almoço), o *Tempo Disponível* para produção, num período de um ano, é de 6075 horas. Por sua vez, a parcela relativa ao *Tempo Total Necessário* é função da quantidade de anéis que se pretende produzir (tendo em conta percentagens de refugo), a *Produtividade* do equipamento e o seu tempo de *Setup*, e é dada pela seguinte equação:

$$Tempo\ Total\ Necessário = \frac{Quant.Aneis\ a\ Produzir}{Produtividade} + Setup \tag{4.3}$$

A aplicação possui uma base de dados onde tem para cada código de anel, os equipamentos necessários para o produzir, as produtividades de cada equipamento para esse anel, os tempos de setup do equipamento, entre outros.

4.2. Dados Obtidos

Como foi referido anteriormente, uma parte significativa do tempo de estágio foi dispendida na recolha de dados do processo, relevantes para o cálculo das produtividades das máquinas em estudo. O levantamento realizado englobou todas as lavadoras existentes na fábrica, com excepção da LAV-22, localizada no armazém de ferramental, e da LAV-20, que se encontrou desactivada durante o período de levantamento. Posteriormente optou-se por excluir da análise as lavadoras da Sublinha do *Racing* (LAV-23, 24 e 26), devido à sua especificidade, e a lavadora LAV-21 por se tratar de um protótipo.

Parte dos dados recolhidos junto das lavadoras dizem respeito aos tempos de ciclo de lavagem e à quantidade de anéis que entram em cada lavagem. Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores médios dos tempos de ciclo de lavagem para cada lavadora assim como das quantidades de anéis lavados por ciclo.

Tabela 4.1. Tempos de ciclo de lavagem e quantidades lavadas por ciclo (valores médios).

Sub-Linha	Lavadora	Tempo de Ciclo (min)	Quantidades Lavadas por Ciclo		Observações
			Anel Pequeno	Anel Grande	
Três Peças	LAV-14	13,50	6 bobines		comprimento da bobine 200mm
	LAV-31 (PRG1)	32,00 (9,45)	3 bobines		
	LAV-31 (PRG2)	16,00 (7,00)	3 bobines		
UFLEX	LAV-27	25,12 (16,19)	5,75 varas		varas de 423mm
	LAV-29	36,77	35 árvores		árvores de 260 mm
Comum	LAV-01	13,21	2 varas		só é usada metade da capacidade das máquinas
	LAV-02	14,77	2 varas	2 varas	
Hard Chrome	LAV-05	16,91	4 varas	4 varas	
	LAV-06	13,27	3,4 varas	3,4 varas	
	LAV-09	13,59	4 varas	4 varas	
	LAV-25	12,24	3,5 varas	3,5 varas	está fora da sub-linha
Ceramic Chrome	LAV-03	19,35	4 varas	4 varas	
	LAV-04	15,91	3,5 varas	3,5 varas	
	LAV-08	11,24	4,5 varas	4,5 varas	
	LAV-10	13,54	3 varas	3 varas	
Otto / I-Shaped	LAV-19	9,00	4 varas	2,5 varas	
	LAV-30	13,98 (11,82)	3 varas	3 varas	
Aço - PVD	LAV-16	12,85	4 varas	3 varas	
	LAV-15	18,10	4,3 varas	2,75 varas	
	LAV-18	27,59	4,3 varas	2,75 varas	
	LAV-28	18,25 (6,00)	2 varas	1,5 varas	só lava para PVD

Consideram-se anéis pequenos os que têm diâmetro inferior a 100mm, e grandes os que têm diâmetro superior. Como se pode observar, a quantidade média de varas de anéis lavadas por ciclo pode diferir em função do diâmetro do anel, uma vez que, nos casos em que os anéis são colocados em cestos, existem dois tipos de cesto, um para anéis com diâmetro inferior a 100mm e outro para anéis com diâmetro superior a 100mm. Por outro lado a quantidade média de varas lavadas por ciclo pode variar em função da lavadora (porque existem vários modelos diferentes e consequentemente com capacidades diferentes) e do processo a montante (se a operação anterior for uma operação gargalo opta-se por cargas menores de modo a manter uma alimentação constante da operação seguinte). Este último ponto foi observado nas lavadoras LAV-01 e 02, nas quais os operadores apenas utilizavam metade da capacidade das máquinas em cada ciclo de lavagem. Uma vez que estas máquinas estão incluídas em duas células idênticas e encostadas uma à outra, propôs-se que as duas células partilhassem uma só máquina, libertando a outra para uma sublinha que apresente ocupações mais elevadas. Isto seria facilmente conseguido rodando ligeiramente as máquinas constituintes das duas células, de modo a localizar ambos os processos que implica lavagem junto da lavadora, e invertendo o sentido de rotação do processo numa delas.

Na coluna dos tempos de ciclo de lavagem pode observar-se que em algumas lavadoras temos dois tempos (p.e. na LAV-27 que tem: 25,12 (16,19)), isto acontece nas lavadoras em que o processo é contínuo (o cesto *n+1* seca enquanto o cesto *n* lava), sendo o primeiro valor correspondente ao tempo médio de saída do primeiro cesto (e ao tempo médio que cada cesto permanece dentro da máquina), e o segundo valor (entre parênteses) corresponde ao intervalo de tempo entre as saídas dos cestos seguintes. Na Figura 4.2 pode ser observada a diferença entre os processos de lavagem contínuos e os descontínuos.

Figura 4.2. Processo de lavagem contínuo (LAV-27) e descontínuo (LAV-16).

Um outro elemento importante para o cálculo das produtividades é o número de lavagens que cada tipo de anel faz em cada lavadora. Uma vez que o registo das lavagens apenas era feito nas lavadoras das sublinhas dos anéis de aço (Otto/I-Shaped e Aço-PVD), nas restantes linhas, este levantamento foi feito anotando, à medida que se fazia o levantamento dos tempos e cargas, as operações a montante e a jusante da lavagem. Posteriormente os dados obtidos foram comparados com as IUA's (Instrução de Usinagem de Anel) e validados juntos dos responsáveis de cada sublinha. Os dados obtidos estão compilados na Tabela 4.2 onde se pode ver o número de lavagens que cada tipo de anel realiza ao longo do seu processo produtivo, assim como, em que lavadoras as lavagens são realizadas.

Tabela 4.2. Localização e número de lavagens que cada anel realiza ao longo do seu processo produtivo.

		LAVADORAS																				
Sub-Linha	Tipo de Anel	LAV-01	LAV-02	LAV-03	LAV-04	LAV-05	LAV-06	LAV-08	LAV-09	LAV-10	LAV-14	LAV-15	LAV-16	LAV-18	LAV-19	LAV-20	LAV-25	LAV-27	LAV-28	LAV-29	LAV-30	LAV-31
Três Peças	EP - Nitretado																					2
	SE - Nitretado																					4
	SE - Nitr. + PVD																		1			5
	SE - Aço + PVD																		1			4
	SE - Aço + Crom.										1											1
UFLEX	UFLEX																	1		1		
Comum	CO - Tipo 1	1																				
	CO - Tipo 2	1	1																			
	CO - Tipo 3		2																			
	OL - Tipo 1		1	1			0,5		0,5													
	OL - Tipo 2		1				0,5		0,5													
Hard Chrome	CR - Pequeno					1											1					
	CR - Grande		1				1										1					
	CB - Pequeno					1	1,5		1,5													
	CB - Grande					1	0,5		1,5													
Ceramic Chrome	MC236s - Tipo 1			1	2			2														
	MC236s - Tipo 2			1	2			1		1												
	MC236s - Tipo 3			1	1			1		1												
	MC236f - Tipo 1			1				1		1												
	MC236f - Tipo 2			1	2			1		1												
	PVD - HV				1					1									1			
Otto / I-Shaped	NIT OTTO											1		1	3						1	
	I-Shaped											1		1	3						1	
Aço - PVD	NIT HDD											1	2	1								
	NIT PVD OTTO											1	4	1					1			
	NIT PVD HDD											1	4	1					1			

Os números indicam o número de lavagens que o anel realiza na lavadora respectiva, no entanto, como se pode observar nas lavadoras LAV-06 e 09, existem valores de 0,5, que não correspondem a meia lavagem. Estes valores significam que após a operação da fresa de fendas os anéis tanto são lavados na LAV-06 como na LAV-09. Isto porque existem duas células para fazer a operação de fresa de fendas, e cada uma das lavadoras está junto de uma das células. Assim, metade das lavagens resultantes desta operação são realizadas na LAV-06 e a outra metade na LAV-09.

4.3. Produtividades e Ocupação das Lavadoras

Como foi referido anteriormente, a produtividade de uma lavadora indica o número de anéis acabados que esta lava por hora. A produtividade de uma lavadora não é constante, variando consoante o tipo de anel. Esta variação deve-se ao facto de a produtividade ser dependente da altura do anel e do seu processo produtivo. Embora o número de varas que entra em cada carga de lavagem seja aproximadamente constante o

número de anéis que cada vara contém varia com o tipo de anel – uma vara de anéis tem em média 700mm de comprimento, tendo que se dividir este comprimento pela altura do anel para se saber o número de anéis que cada vara contém. A Figura 4.3 ilustra a relação entre a produtividade e a altura dos anéis.

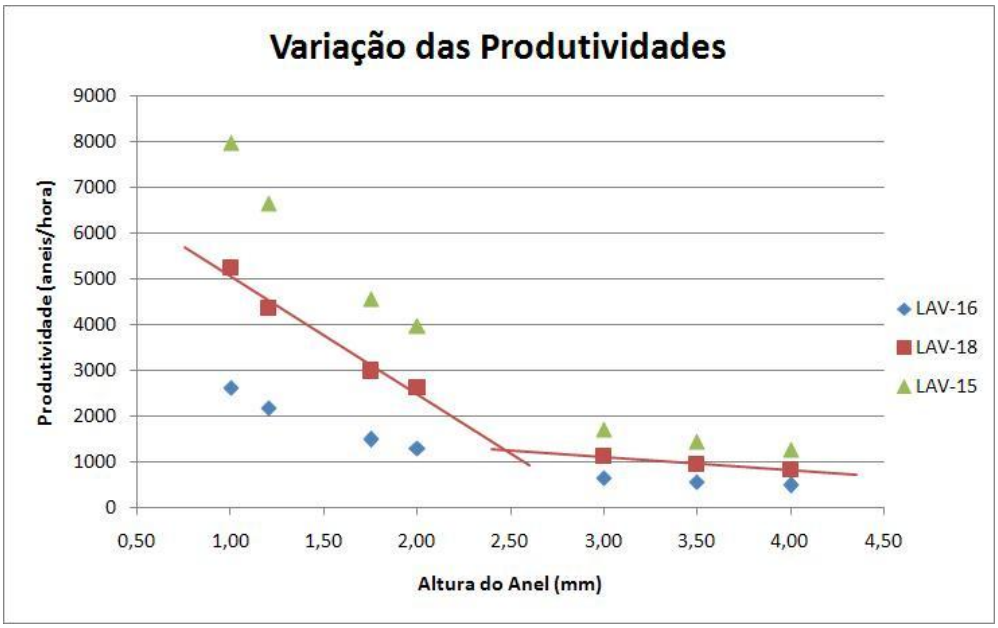


Figura 4.3. Variação da produtividade em função da altura do anel.

Pode-se observar que a variação da produtividade é linear. A quebra de linearidade observada deve-se a as alturas mais baixas representarem anéis pequenos, e as maiores representarem anéis grandes, que, como foi explicado anteriormente, têm cestos de lavagem diferentes, que levam menos varas. Apesar de serem duas famílias diferentes de anéis, o seu processo produtivo é idêntico, no que a lavagens diz respeito.

Uma vez que a produtividade representa o número de anéis acabados lavados por hora, o número de lavagens que cada família de anéis realiza numa lavadora ao longo do seu processo produtivo é o factor que mais influencia a produtividade da lavadora. Isto porque é necessário dividir o número de anéis lavados por hora, pelo número de vezes que esses mesmos anéis lavarem na lavadora. Assim, se na lavadora X, com capacidade para lavar 10000 anéis/hora, os anéis do tipo A lavarem uma única vez a produtividade da lavadora será 10000 anéis acabados/hora. No entanto, se na mesma lavadora, os anéis do tipo B, iguais aos do tipo A, lavarem duas vezes, a produtividade da lavadora X para os anéis do tipo B será 5000 anéis acabados/hora. A variação das produtividades em função do número de lavagens pode ser observada na Figura 4.4.

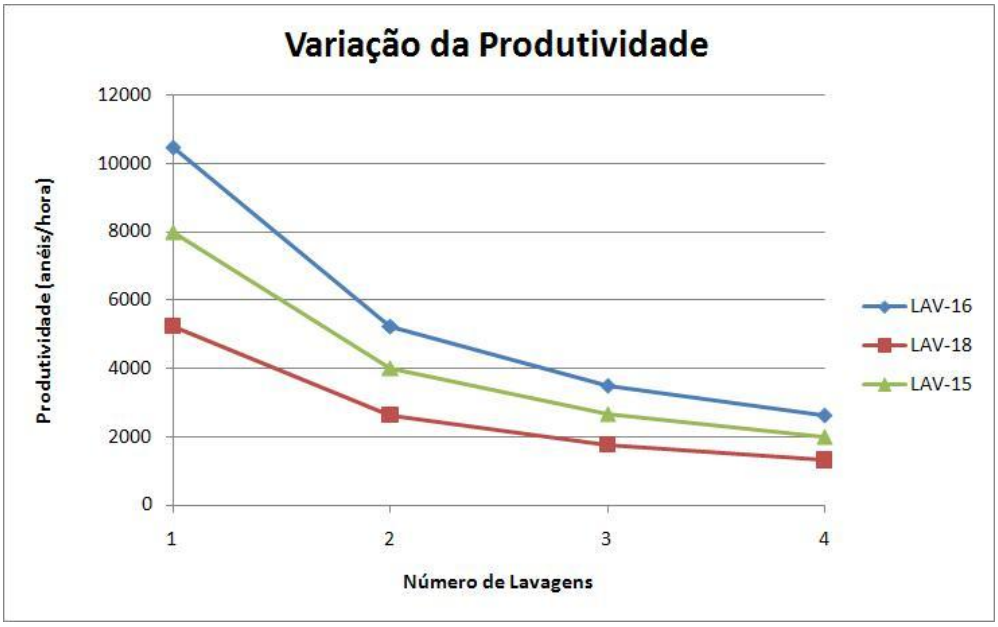


Figura 4.4. Variação da produtividade em função do número de lavagens.

Os valores apresentados representam uma simulação da variação das produtividades das lavadoras LAV-15, 16 e 18, para o mesmo tipo de anel, em função do número de lavagens ao longo do processo produtivo.

Uma vez calculadas todas as produtividades, procedeu-se à actualização da base de dados da aplicação que calcula a Ocupação dos equipamentos. Simulou-se a produção prevista para os anos 2013 e 2014, considerando 270 dias de trabalho por ano. Após filtragem e análise dos resultados obteve-se os valores das ocupações das lavadoras relativas à produção prevista para os anos simulados, e que podem ser observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Previsão da ocupação das lavadoras nos anos 2013 e 2014 para o layout actual.

Sub-Linha	Comum		Ceramic Chrome				Hard Chrome				Aço-PVD				Otto / I-Shaped		UFLEX		Três Peças		Ocupação Média
Lavadoras	LAV-01	LAV-02	LAV-03	LAV-04	LAV-08	LAV-10	LAV-05	LAV-06	LAV-09	LAV-25	LAV-16	LAV-15	LAV-18	LAV-28	LAV-19	LAV-30	LAV-27	LAV-29	LAV-14	LAV-31	
2013	22%	29%	40%	71%	21%	36%	43%	58%	53%	2%	86%	60%	93%	29%	41%	21%	22%	12%	21%	51%	41%
2014	24%	39%	39%	71%	19%	40%	42%	57%	52%	2%	102%	75%	115%	41%	53%	28%	15%	9%	17%	107%	47%

Pode-se desde já observar que actualmente as lavadoras LAV-16 e LAV-18 estão a trabalhar com valores críticos de ocupação, e que em 2014 atingirão a ruptura, uma vez que a capacidade instalada não será suficiente para satisfazer a procura. Isto também se verifica na LAV-31. Para uma melhor compreensão dos resultados dispôs-se os mesmos graficamente, como pode ser observado na Figura 4.5.

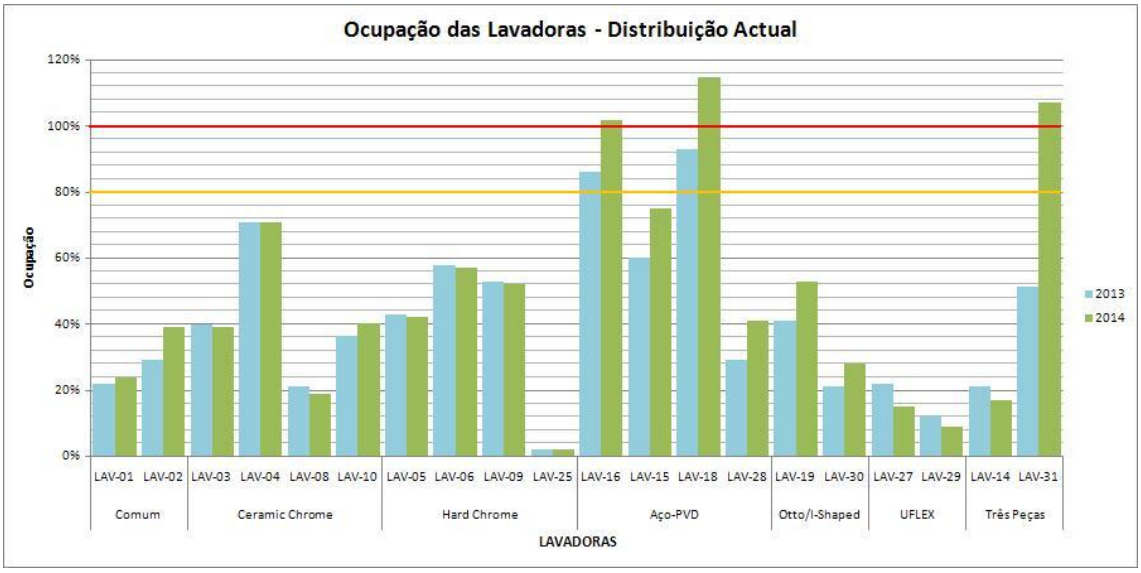


Figura 4.5. Ocupação prevista das lavadoras para os anos 2013 e 2014, para a distribuição actual.

Como se pode observar a ocupação das lavadoras varia de sublinha para sublinha. É de notar o contraste entra a ocupação da sublinha Aço-PVD e a da sublinha UFLEX. Estas diferenças de ocupação devem-se à elevada importância que as operações de lavagem têm nos anéis Aço-PVD, que apresentam um elevado número de operações de lavagem ao logo do seu processo produtivo. É também de notar a quase insignificante ocupação da lavadora LAV-25, que se deve ao facto de esta se situar fora da sublinha que a usa, no entanto, este aspecto será futuramente solucionado quando se transferir a máquina para a sua sublinha.

Um ponto crítico que também se pode observar diz respeito à LAV-31. Neste caso, devido a um aumento brusco da procura por anéis Três Peças é de prever que no próximo ano esta lavadora deixará de ter capacidade instalada suficiente para a procura estimada. Aqui o problema poderá ser resolvido (1) optimizando os tempos de ciclo de lavagem, (2) aumentando a capacidade dos cestos e consequentemente dos tanques de lavagem e (3) eliminando lavagens no processo produtivo, aumentando assim a produtividade da máquina.

Dada a elevada ocupação das lavadoras da sublinha do Aço-PVD, a empresa decidiu adquirir uma nova lavadora para esta sublinha. A opção por adquirir uma nova lavadora em detrimento da relocalização de uma outra qualquer existente na fábrica (que tenha baixa ocupação), deve-se ao facto de não existir nenhuma lavadora que possa ser libertada e que cumpra o pretendido em termos de requisitos pretendidos (produtividade,

tipo de lavagem, eficácia de lavagem, etc.). Seguidamente explorar-se-á o trabalho desenvolvido no sentido de proporcionar dados que suportem esta decisão.

4.4. Projecto de Compra da Nova Lavadora

Tendo-se optado por avançar com a compra de uma nova lavadora, foram propostos vários cenários de nova reorganização das lavadoras pelas sublinhas, que incidiram principalmente na redistribuição das lavadoras pertencentes às sublinhas dos anéis de aço (Otto/I-Shaped e Aço-PVD). Dos cenários propostos seleccionaram-se dois e estudou-se o impacto, nas ocupações das lavadoras, da sua implementação.

Actualmente as sublinhas Otto/I-Shaped e Aço-PVD partilham as lavadoras LAV-15 e LAV-18. Nos novos cenários propostos pretende-se acabar com a partilha de lavadoras entre sublinhas. A Tabela 4.4 sumariza as alterações propostas na distribuição das lavadoras.

Tabela 4.4. Principais alterações na distribuição das lavadoras.

Lavadoras	Actual	Cenário 1	Cenário 2
LAV-15	Lavagens antes da operação Folga 100% (Otto/I-Shaped e Aço-PVD)	Lavagens antes das operações Folga 100% e Nitretação (Otto/I-Shaped)	Lavagens antes das operações Folga 100% e Nitretação (Otto/I-Shaped)
LAV-18	Lavagens antes da operação Nitretação (Otto/I-Shaped e Aço-PVD)	Lavagens antes de Alivio de Tensões e após Rectifica Lateral (Aço-PVD)	Lavagens antes de Alivio de Tensões e após Rectifica Lateral (Aço-PVD)
LAV-32		Lavagens antes das operações Folga 100% e Nitretação (Aço-PVD)	Lavagens antes das operações Folga 100% e Nitretação (Aço-PVD)
LAV-02	Célula C02 do Comum	Célula C02 do Comum	Lavagens após bombeamento (Otto/I-Shaped)

Uma vez definidos os cenários calculou-se as novas produtividades para as lavadoras que sofreram alteração e actualizou-se a base de dados da aplicação que calcula as ocupações.

Simulou-se cada novo cenário com os mesmos valores de procura, para os anos 2013 e 2014, e para os mesmo 270 dias de produção que se simulou anteriormente para a distribuição actual de lavadoras. Os resultados da simulação estão presentes na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

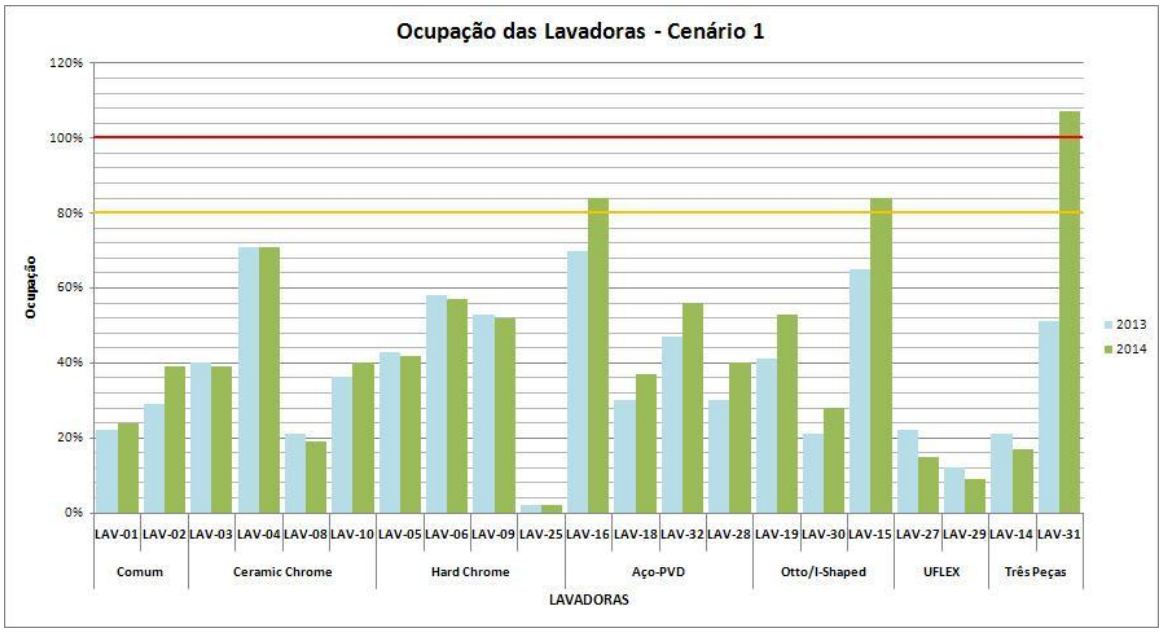


Figura 4.6. Ocupação prevista das lavadoras para os anos 2013 e 2014, para o cenário 1.

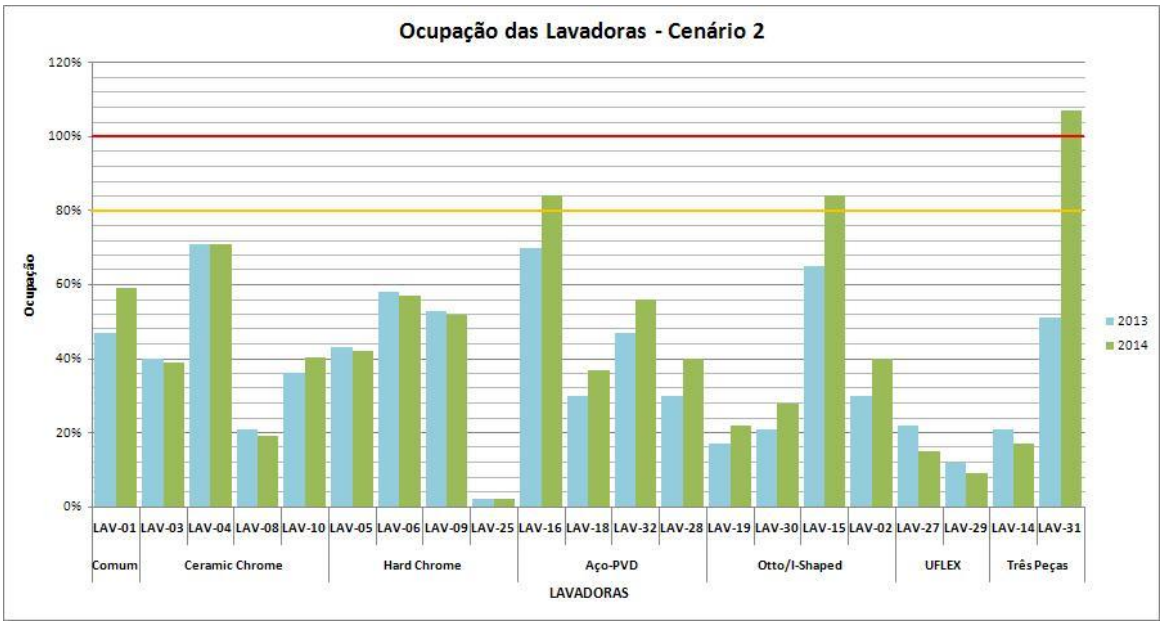


Figura 4.7. Ocupação prevista das lavadoras para os anos 2013 e 2014, para o cenário 2.

Como é claramente visível, em ambos os cenários, conseguiu-se atingir um maior equilíbrio nas ocupações das lavadoras. A aquisição da nova lavadora reduzirá significativamente as ocupações das lavadoras da sublinha Aço-PVD, que já se

apresentavam com valores críticos, e eliminará a partilha de máquinas entre as duas sublinhas dos anéis de aço, conseguindo-se assim solucionar dois problemas críticos que afectam as sublinhas dos anéis de aço. Prevê-se também que a aquisição da nova lavadora trará ganhos na qualidade das lavagens e consequentemente no produto final.

Também na ocupação média das lavadoras os cenários 1 e 2 obtêm melhores resultados (37% e 38% em 2013, 44% em 2014) do que a distribuição actual (41% em 2013 e 47 % em 2014).

5. METODOLOGIA PARA O ESTUDO DE *LAYOUTS* ALTERNATIVOS

Uma vez estudada a distribuição actual das lavadoras pela unidade fabril, e conhecidas as suas ocupações, estudar-se-ão, no presente capítulo, novas possibilidades de *layout*, no que à distribuição das lavadoras diz respeito.

De modo a facilitar o estudo de novos cenários para a distribuição das lavadoras, optou-se por desenvolver um modelo matemático de programação linear, que terá como função objectivo minimizar a distância total percorrida pelo anel ao longo do seu processo produtivo. Analisar-se-á qual dos cenários estudados apresenta menor distância total percorrida e qual apresenta a menor ocupação média das lavadoras.

Dada a simplicidade do problema, do modelo e de se pretender criar uma ferramenta simples e intuitiva que possa ser usada futuramente pela empresa, desenvolveu-se uma aplicação em *Microsoft Excel*™ que resolve o modelo recorrendo ao *add-in Premium Solver Pro*™.

Neste estudo consideraram-se apenas as quatro principais, e maiores, sublinhas: Ceramic Chrome; Hard Chrome; Otto/I-Shaped; Aço-PVD. Excluiu-se as sublinhas mais pequenas devido à sua especificidade e por terem um menor peso no volume total produzido. Exclui-se também da simulação a lavadora LAV-28, e consequentemente o processo PVD, uma vez que esta lavadora está dedicada a este processo, não executando mais nenhum tipo de lavagem.

Utilizando a ferramenta desenvolvida estudou-se três cenários diferentes:

- **CENÁRIO A**

  Neste cenário considerou-se a distribuição actual das lavadoras, eliminando-se todas as restrições – partilha de lavadoras entre linhas, cruzamento de fluxos de anéis de diferentes famílias e matérias-primas, etc.

- **CENÁRIO B**

  Neste segundo cenário considerou-se a criação, em cada sublinha, de uma célula de lavagem composta pelas lavadoras actualmente existentes nessa sublinha. Localizando a célula de lavagem centralmente na sublinha, considerou-se restrições que obrigam os anéis a lavar na célula de lavagem da sublinha em que são produzidos.

- **CENÁRIO C**

  Novamente considerou-se a criação de células de lavagem, optando-se, neste caso, por criar apenas duas células – uma partilhada pelas sublinhas dos anéis de aço e a outra pelas sublinhas dos anéis de ferro fundido. Localizaram-se estas células nas interfaces entre as sublinhas.

Na formulação matemática desenvolvida, aplicou-se um método de cálculo de produtividades e ocupações diferente do demonstrado no capítulo anterior, e utilizado na aplicação actualmente em uso na empresa. As produtividades deixaram de ser variáveis, (1) utilizando-se valores médios de produtividade, o que permitiu acabar com a sua variação em função da altura do anel, e (2) transferindo-se a variação resultante do número de lavagens que o anel faz ao longo do processo para a quantidade de anéis que cada lavadora tem de lavar, não havendo assim distinção entre produto acabado e produto intermédio. A ocupação, por sua vez, passa a ser calculada por um quociente de quantidades e não por um quociente de tempos, como anteriormente.

5.1. Formulação Matemática do Problema

Considere-se a seguinte notação:

a – número da sublinha

i – número da operação que origina lavagem

j – número da lavadora ou célula de lavagem

k – número do produto

m – número total de lavadoras ou células de lavagem

m' – número total de lavadoras ou células de lavagem pertencentes a uma sublinha

o – número total de operações que originam lavagem

p – número total de produtos diferentes

$M = \{j, \ldots, m\}$ – conjunto das m lavadoras

$O = \{i, \ldots, o\}$ – conjunto das o operações que originam lavagens

$P = \{k, \ldots, p\}$ – conjunto dos p tipos de produtos a lavar

$SL_a = \{j, \ldots, m'\}$ – conjunto das m' lavadoras pertencentes à sublinha a

V_k – procura relativa ao produto k

R_j – produtividade da lavadora j

N_{ik} – número de operações i que o produto k realiza

D_{ij} – distância entre a operação i e a lavadora j

V_i – procura pela operação i

V_{ik} – procura da operação i relativa ao produto k

Q_{ij} – distribuição da procura das operações i pelas lavadoras j

Dist – distância total percorrida para produzir todos os produtos

Z – função objectivo

W_j – ocupação da lavadora j

O modelo engloba parâmetros de entrada (*Input*), parâmetros relativos ao processo de fabrico e parâmetros dependentes da distribuição das lavadoras no *layout* fabril. Como parâmetros de entrada considera-se os parâmetros relativos à simulação, ou seja, o tempo de produção, t, e a quantidade de produtos k que se pretende produzir durante esse tempo, que é representada pelo vector procura, V_k. Nos parâmetros relativos ao processo, tem-se (1) a matriz N_{ik} que representa as operações que implicam lavagem, i, que cada produto, k, realiza durante o seu processo de fabrico, e quantas vezes as realiza, e (2) o vector Rj respeitante às produtividades de cada lavadora j. Por sua vez, a distribuição das lavadoras pelo *layout* fabril é caracterizada pela matriz D_{ij}, que representa as distâncias entre as operações que implicam lavagem, i, e as lavadoras, j.

Considere-se o vector V_i que representa a quantidade de unidades processadas na operação i, e que é definido por:

$$V_i = \sum_{k=1}^{p} V_{ik} \qquad , onde \tag{5.1}$$

$$V_{ik} = N_{ik} . V_k \tag{5.2}$$

representa a matriz da quantidade de unidades relativas ao produto *k* que são processadas na operação *i*. Considere-se ainda Q_i e Q_j, resultantes da matriz distribuição da procura, Q_{ij}, definidos por:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m} Q_{ij} \quad e \quad Q_j = \sum_{i=1}^{o} Q_{ij} \quad , \tag{5.3}$$

e a capacidade máxima de unidades que cada lavadora pode lavar no período de simulação *t*:

$$Q_{j,max} = t.R_j \quad , \tag{5.4}$$

podendo, então, a Ocupação da lavadora *j* ser definida por:

$$W_j = \frac{Q_j}{Q_{j,max}} \tag{5.5}$$

Como já foi referido anteriormente, pretende-se distribuir a procura pelas lavadoras, minimizando a distância total percorrida pelos anéis durante o seu processo produtivo. Tem-se então como ***Variáveis*** do problema a matriz distribuição da procura, Q_{ij}, definindo-se a ***Função Objectivo*** como:

$$Z = \min Dist \qquad , onde \tag{5.6}$$

$$Dist = \sum_{i=1}^{o} \sum_{j=1}^{m} D_{ij}.Q_{ij} \ , \tag{5.7}$$

representa a distância total percorrida para produzir toda a procura *V*, sendo que esta distância é apenas resultante da movimentação provocada pelas operações de lavagem.

A função objectivo está sujeita às restrições:

1. Todos os valores na matriz Q_{ij} têm de ser positivos ou zero:

$$Q_{ij} \geq 0 \tag{5.8}$$

2. Toda a procura tem de ser produzida/lavada:

$$Q_i = V_i \tag{5.9}$$

3. As quantidades atribuídas a uma lavadora não podem exceder a sua capacidade máxima:

$$Q_j \leq Q_{j,max} \tag{5.10}$$

4. A ocupação de cada lavadora não pode ultrapassar os 80%:

$$W_j \leq 0{,}80 \tag{5.11}$$

5. As lavagens têm de ser realizadas na célula de lavagem pertencente à(s) sublinha(s) onde as operações foram realizadas:

$$Q_{ij} = 0 \quad , se \;\; j \notin SL_a \tag{5.12}$$

Sendo que a restrição 5. apenas é aplicada nos Cenários B e C.

5.2. Simulação e Resultados

As simulações realizadas para os cenários em estudo consideram, como parâmetros de entrada, a execução em 270 dias do plano de produção simulado no capítulo anterior, referente ao ano 2013. O plano de produção foi agrupado por tipo de anel constituindo o seguinte vector procura:

Tabela 5.1. Procura relativa ao ano 2013, por tipo de anel.

Produto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tipo de Anel	I-Shaped	NIT OTTO	NIT HDD	NIT PVD HDD	NIT PVD OTTO	MC236s	MC236f	PVD HV	CB	CR	OL
Procura (aneis)	2.472.119	2.983.867	969.132	1.189.545	3.116.039	5.221.212	374.939	691.333	9.021.747	313.915	1.104.643

Nos Anexos A.1, A.2 e A.3, referentes ao *layout* fabril, estão representadas as localizações das lavadoras e células de lavagem relativas aos cenários A, B e C respectivamente. Por sua vez, nos Anexos B.1, B.2 e B.3 estão representadas as matrizes das distâncias entre as operações que implicam lavagem e as lavadoras/células. Importa referir que o *layout* fabril fornecido pela empresa não possuía escala, pelo que as distâncias apresentadas nas matrizes dizem respeito a distâncias lineares e terão como unidade: *unidades de distância*.

Nos parâmetros relativos ao processo são consideradas as produtividades apresentadas na Tabela 5.2. As produtividades das células de lavagem correspondem à soma das produtividades das lavadoras que as constituem.

Tabela 5.2. Produtividades médias das lavadoras.

Lavadora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	LAV-03	LAV-04	LAV-05	LAV-06	LAV-08	LAV-09	LAV-10	LAV-15	LAV-16	LAV-18	LAV-19	LAV-25	LAV-30
Produtividade (an/h)	3000	3090	3182	3446	5624	3246	3113	3946	5314	2589	7559	3846	4477

Seguidamente apresentar-se-ão os resultados da simulação para cada um dos cenários acima descritos.

5.2.1. CENÁRIO A

Durante a simulação, o simulador diagnostica o problema como sendo *LP Convex*, tendo encontrado uma solução que satisfaz todas as restrições e condições de optimalidade, sendo a solução encontrada um óptimo global (melhor solução possível). Na Tabela 5.3 encontra-se a solução encontrada pelo simulador.

Tabela 5.3. Matriz distribuição da produção – CENÁRIO A.

			LAVADORAS												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		OPERAÇÕES	LAV-03	LAV-04	LAV-05	LAV-06	LAV-08	LAV-09	LAV-10	LAV-15	LAV-16	LAV-18	LAV-19	LAV-25	LAV-30
Aço - PVD	1	Alivio Tensões	0	0	0	0	0	0	0	0	5.274.716	0	0	0	0
	2	Bombeamento	0	0	0	0	0	0	0	0	10.769.845	0	0	0	0
	3	Nitretação Gasosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.274.716	0	0	0
	4	Folga 100%	0	0	0	0	0	0	0	5.274.716	0	0	0	0	0
	5	Lapidação	0	0	0	0	0	0	0	0	5.274.716	0	0	0	0
Otto/I-Shaped	6	Alivio Tensões	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.455.986
	7	Retifica Lateral	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.439.853	0	0
	8	Bombeamento	0	0	6.237.487	0	0	1.690.618	0	0	0	0	0	0	0
	9	Nitretação Gasosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.455.986	0	0	0
	10	Folga 100%	0	0	0	0	0	0	0	5.455.986	0	0	0	0	0
Hard Chrome	11	Retifica Lateral	0	0	0	0	9.492.620	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	Bomb./Lapid.	0	0	0	4.510.874	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	Freza Fendas 01	0	0	0	0	0	5.063.195	0	0	0	0	0	0	0
	14	Freza Fendas 02	0	0	0	5.063.195	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	Ret. Topo	0	0	0	156.958	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	Mandrilamento	0	0	0	0	0	9.021.747	0	0	0	0	0	0	0
Ceramic Chrome	17	Retifica Lateral	0	7.204.658	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	Bombeamento	0	0	0	0	1.305.303	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	Retifica de Topo	5.783.621	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	RTZ	0	0	0	0	0	0	11.883.635	0	0	0	0	0	0
	21	Lapidação	0	0	0	0	5.596.151	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	Mandrilamento	0	0	0	0	1.305.303	0	0	0	0	0	0	0	0

A esta distribuição da produção corresponde uma ocupação média das lavadoras de 43,15%, sendo a distância total percorrida pelos anéis de 219.596.198 unidades de distância, ou seja, cada anel percorre 8 unidades de distância para efectuar operações de lavagem. Na Figura 5.1 são apresentadas as ocupações correspondentes a cada lavadora.

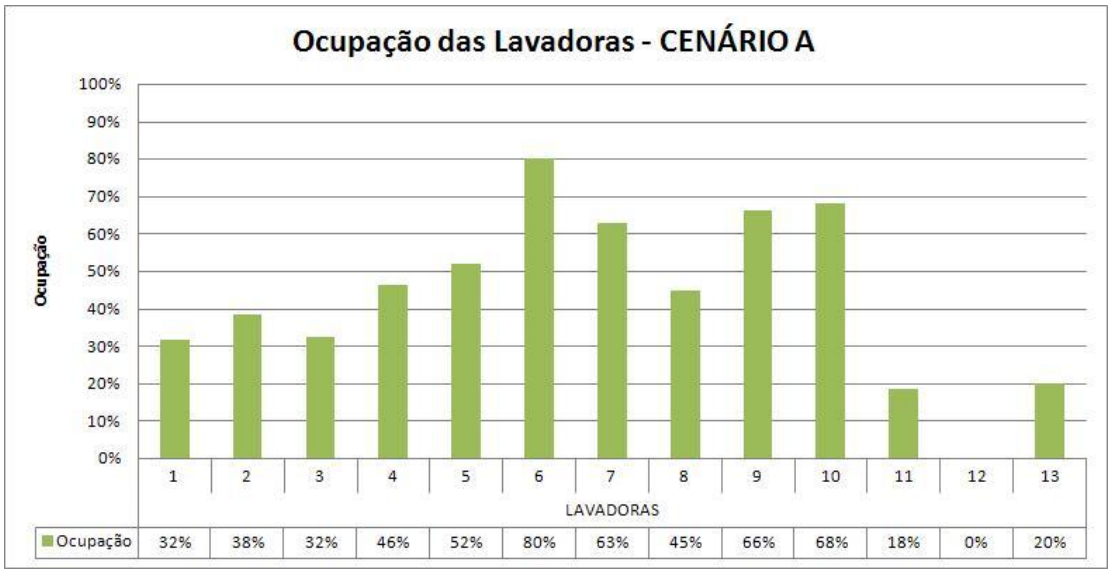


Figura 5.1. Ocupação das lavadoras – CENÁRIO A.

Como seria de esperar (sendo um problema de minimização de distância percorrida sem restrições na distribuição da produção pelas lavadoras) a lavadora 12 (LAV-25) apresenta uma ocupação de 0%, uma vez que se encontra bastante afastada das sublinhas em estudo. Pela análise da Tabela 5.3, pode ser observado que há cruzamento de fluxos, havendo anéis que vão lavar nas lavadoras da sublinha vizinha, p.e. as lavagens relativas à operação de bombeamento da sublinha Otto/I-Shaped que vão lavar nas lavadoras 3 e 6 situadas na sublinha Hard Chrome. É possível verifica que não existe um balanceamento das ocupações, pelo que se pode concluir que a solução que optimiza a distância percorrida, não optimiza o balanceamento das ocupações.

5.2.2. CENÁRIO B

Também neste caso, o simulador diagnosticou o problema como sendo *LP Convex*, pelo que a solução encontrada satisfaz todas as restrições e condições de optimalidade, sendo a solução óptimo global. Na Tabela 5.4 encontra-se a solução encontrada pelo simulador.

Tabela 5.4. Matriz distribuição da produção – CENÁRIO B.

			CÉLULAS DE LAVAGEM												
			1				2				3			4	
		OPERAÇÕES	LAV-03	LAV-04	LAV-08	LAV-10	LAV-05	LAV-06	LAV-09	LAV-25	LAV-15	LAV-16	LAV-18	LAV-19	LAV-30
Aço - PVD	1	Alivio Tensões	0				0				5.274.716			0	
	2	Bombeamento	0				0				10.769.845			0	
	3	Nitretação Gasosa	0				0				5.274.716			0	
	4	Folga 100%	0				0				5.274.716			0	
	5	Lapidação	0				0				5.274.716			0	
Otto/I-Shaped	6	Alivio Tensões	0				0				0			5.455.986	
	7	Retifica Lateral	0				0				0			8.439.853	
	8	Bombeamento	0				0				0			7.928.105	
	9	Nitretação Gasosa	0				0				0			5.455.986	
	10	Folga 100%	0				0				0			5.455.986	
Hard Chrome	11	Retifica Lateral	0				9.492.620				0			0	
	12	Bomb./Lapid.	0				4.510.874				0			0	
	13	Freza Fendas 01	0				5.063.195				0			0	
	14	Freza Fendas 02	0				5.063.195				0			0	
	15	Ret. Topo	0				156.958				0			0	
	16	Mandrilamento	0				9.021.747				0			0	
Ceramic Chrome	17	Retifica Lateral	7.204.658				0				0			0	
	18	Bombeamento	1.305.303				0				0			0	
	19	Retifica de Topo	5.783.621				0				0			0	
	20	RTZ	11.883.635				0				0			0	
	21	Lapidação	5.596.151				0				0			0	
	22	Mandrilamento	1.305.303				0				0			0	

À distribuição óptima da produção no cenário B corresponde uma ocupação média das células de lavagem de 46,43%, sendo a distância total percorrida pelos anéis de 478.125.708 unidades de distância. Isto significa que a distância percorrida por cada anel é 17,4 unidades de distância, mais do dobro que no cenário A. Pode-se observar que, não há cruzamento de fluxos, uma vez que todos os anéis lavam na célula de lavagem da sublinha onde são produzidos. Na Figura 5.2 são apresentadas as ocupações correspondentes a cada célula.

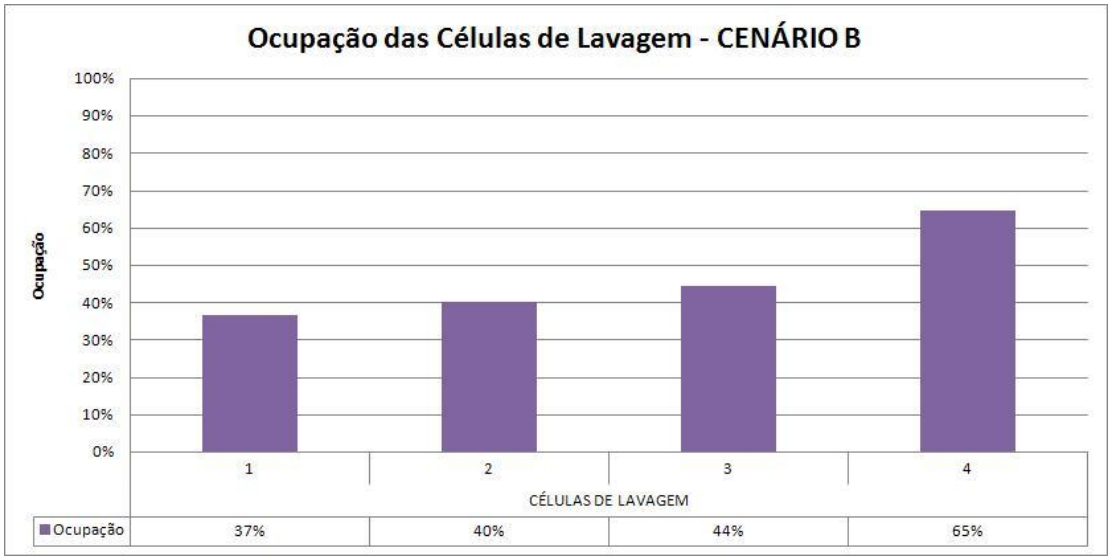


Figura 5.2. Ocupação das células de lavagem – CENÁRIO B.

Como é possível verificar, existe algum equilíbrio entre as células 1, 2 e 3. O facto de este cenário eliminar por completo as partilhas de lavadoras entre sublinhas, leva a que ocupação da célula 4 – sublinha Otto/I-Shaped – seja elevada, uma vez que actualmente esta sublinha partilha duas lavadoras com a sublinha Aço-PVD. Assumindo que dentro das células a distribuição da produção pelas lavadoras que as constituem é uniforme, e considerando-se apenas as células 1, 2 e 3, pode concluir-se que este cenário proporciona um melhor balanceamento das ocupações que o cenário A. Pode-se ainda afirmar que aumentando a capacidade da célula 4, o balanceamento das ocupações tenderá para um valor óptimo. No entanto, como já foi visto anteriormente, a aplicação de um modelo que agrupe as lavadoras em células aumenta significativamente a distância percorrida pelos anéis durante o seu processo de fabrico.

5.2.3. CENÁRIO C

Uma vez mais, o simulador diagnosticou o problema como sendo *LP Convex*, e a solução encontrada é óptimo global, satisfazendo todas as restrições e condições de optimalidade. Na Tabela 5.5 encontra-se a solução encontrada pelo simulador.

Tabela 5.5. Matriz distribuição da produção – CENÁRIO C.

			CÉLULAS												
			1								2				
		OPERAÇÕES	LAV-03	LAV-04	LAV-08	LAV-10	LAV-05	LAV-06	LAV-09	LAV-25	LAV-15	LAV-16	LAV-18	LAV-19	LAV-30
Aço - PVD	1	Alivio Tensões				0							5.274.716		
	2	Bombeamento				0							10.769.845		
	3	Nitretação Gasosa				0							5.274.716		
	4	Folga 100%				0							5.274.716		
	5	Lapidação				0							5.274.716		
Otto/I-Slaped	6	Alivio Tensões				0							5.455.986		
	7	Retifica Lateral				0							8.439.853		
	8	Bombeamento				0							7.928.105		
	9	Nitretação Gasosa				0							5.455.986		
	10	Folga 100%				0							5.455.986		
Hard Chrome	11	Retifica Lateral				9.492.620							0		
	12	Bomb./Lapid.				4.510.874							0		
	13	Freza Fendas 01				5.063.195							0		
	14	Freza Fendas 02				5.063.195							0		
	15	Ret. Topo				156.958							0		
	16	Mandrilamento				9.021.747							0		
Ceramic Chrome	17	Retifica Lateral				7.204.658							0		
	18	Bombeamento				1.305.303							0		
	19	Retifica de Topo				5.783.621							0		
	20	RTZ				11.883.635							0		
	21	Lapidação				5.596.151							0		
	22	Mandrilamento				1.305.303							0		

O cenário C, composto por apenas duas células de lavagem é o que consegue uma melhor ocupação média (41,40%), sendo a distância total percorrida pelos anéis de 460.221.630 unidades de distância. Cada anel percorre 16,8 unidades de distância. Uma vez mais, é visível que não há cruzamento de fluxos, lavando todos os anéis na célula correspondente à sublinha onde são produzidos. Na Figura 5.3 são apresentadas as ocupações correspondentes a cada célula.

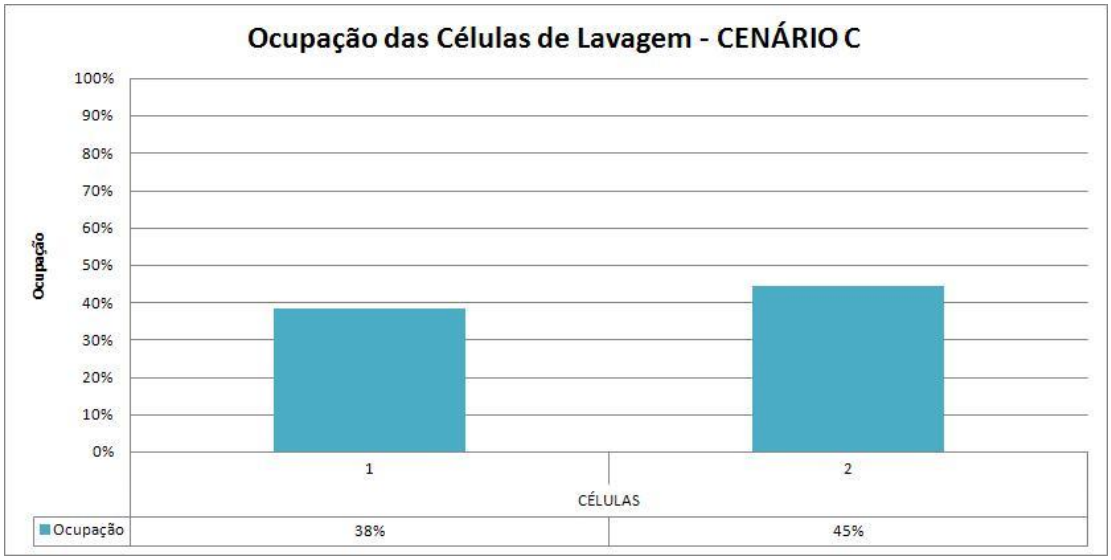


Figura 5.3. Ocupação das células de lavagem – CENÁRIO C.

É evidente um equilíbrio nas ocupações entre as duas células. Uma vez mais, assumindo que dentro das células a distribuição da produção pelas lavadoras que as constituem é uniforme, é possível concluir que o cenário C é o que melhor optimiza o balanceamento das ocupações das lavadoras.

6. CONCLUSÕES

O estudo realizado, tendo incidido sobre os processos de lavagem da unidade industrial da MAHLE Murtede, teve como objectivo analisar e optimizar as produtividades e ocupações das lavadoras. Desenvolveu-se, ainda um modelo matemático de programação linear que pretende facilitar o estudo de diferentes *layouts* para a distribuição das lavadoras.

Durante a fase de levantamento de dados verificou-se que a quantidade média de anéis lavados por ciclo pode variar em função do diâmetro do anel (são usados dois tipos de cesto), da lavadora e do processo a montante. Verificou-se ainda que a produtividade de uma lavadora não é constante, variando linearmente com altura do anel. No entanto, o factor que mais influencia a produtividade da lavadora é o número de lavagens que cada anel efectua na lavadora.

Após calculadas as ocupações das lavadoras verificou-se a existência de alguns pontos críticos, uma vez que há lavadoras que, no próximo ano, deixarão de ter capacidade para dar resposta à procura. A lavadora LAV-31 que, devido a um aumento brusco da procura por anéis Três Peças, deixará de ter capacidade, é um exemplo de ponto crítico e será resolvido aumentando a produtividade da lavadora. Verificou-se ainda que a sublinha Aço-PVD é a que apresenta maior ocupação, com valores críticos em duas lavadoras. Isto deve-se à elevada importância que as operações de lavagem têm nos anéis Aço-PVD, que apresentam um elevado número de operações de lavagem ao logo do seu processo produtivo.

Para melhorar os níveis de ocupação da sublinha Aço-PVD, a empresa decidiu adquirir uma nova lavadora. De forma a suportar a decisão de compra da nova lavadora, estudou-se o seu impacto, nas ocupações das lavadoras. Concluiu-se que com a compra da nova lavadora conseguir-se-á um maior equilíbrio nas ocupações, reduzindo significativamente as ocupações das lavadoras da sublinha Aço-PVD. Esta compra permitirá ainda eliminar a partilha de lavadoras entre sublinhas e trará ganhos na qualidade das lavagens e consequentemente no produto final.

Seguidamente, desenvolveu-se um modelo matemático de programação linear de modo a facilitar o estudo de novos *layouts*. Este modelo faz uma distribuição da produção pelos equipamentos minimizando a distância total percorrida pelo anel durante o seu processo de produção.

Utilizando o modelo desenvolvido, estudou-se três diferentes cenários de distribuição das lavadoras. No cenário A considerou-se a distribuição actual das lavadoras, mas eliminando todas as restrições, e nos cenários B e C agrupou-se as lavadoras em quatro e duas células de lavagem, respectivamente. Em todas as simulações a solução encontrada é um óptimo global, pelo que, é a melhor solução possível para o problema.

Após as simulações, analisou-se as distâncias percorridas pelos anéis, sendo o cenário A o que melhor resultado alcança, percorrendo cada anel 8 unidades de distância. Segue-se o cenário C com 16,8 unidades de distância e por último o cenário B com 17,4 unidades de distância percorridas por cada anel. Conclui-se ainda, que o cenário C é o que garante uma melhor ocupação média das lavadoras (41,40%), seguindo-se o cenário A (43,15%) e B (46,43%).

Verificou-se que no cenário A não existe um balanceamento das ocupações das lavadoras e que no cenário B, apesar de a célula 4 apresentar uma ocupação elevada, existe algum equilíbrio entre as células 1, 2 e 3. Por sua vez, o cenário C é o que apresenta um maior equilíbrio das ocupações entre as células, pelo que é possível concluir que este é o que melhor optimiza o balanceamento das ocupações das lavadoras.

Conclui-se portanto que, a aplicação de um modelo que agrupe as lavadoras em células aumenta significativamente a distância percorrida pelos anéis durante o seu processo de fabrico, no entanto é a solução que melhor optimiza o balanceamento das ocupações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chan, F. T., Lau, K. W., Chan, P. L., & Choy, K. L. (2005). Two-stage approach for machine-part grouping and cell layout problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* .

Cossari, A., Ho, J. C., Paletta, G., & Ruiz-Torres, A. J. (2011). A new heuristic for workload balancing on identical parallel machines and a statistical perspective on the workload balancing criteria. *Computers & Operations Research* .

Costa, M., Lima, F., Silva, N., Soares, I., & Sousa, P. (2009). *Motores de Combustão Interna.* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Estêvão, J. M. (1998). *Introdução à Investigação Operacional: Programação Linear.* Faro: Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve.

Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4th ed.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Ham, M., & Fowler, J. W. (2007). Balanced Machine Workload Dispatching Scheme for Wafer Fab. *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference* (pp. 390-395). IEEE.

Hill, A. V. (2012). *The Encyclopedia of Operations Management.* New Jersey: Pearson Education, Inc.

HowStuffWorks. (2012). *How Car Engines Work.* Obtido em 4 de Junho de 2013, de HowStuffWorks: auto.howstuffworks.com/engine.htm

Junior, D. P. (1997). *Motores de Combustão Interna.* São Paulo, Brasil: Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Kumar, S. A., & Suresh, N. (2008). *Production and Operations Management - 2nd Ed.* New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers.

Machado, N. (13 de Setembro de 1993). MANUAL DE FORMAÇÃO. *Tecnologia de Fabricação de Segmentos* . Murtede, Coimbra, Portugal: MAHLE Componentes de Motores S.A.

MAHLE Group. (2013). Obtido em 15 de Maio de 2013, de Web site do Grupo MAHLE: http://www.mahle.com

Martinich, J. S. (1997). *Production and Operations Management: An Applied Modern Approach.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

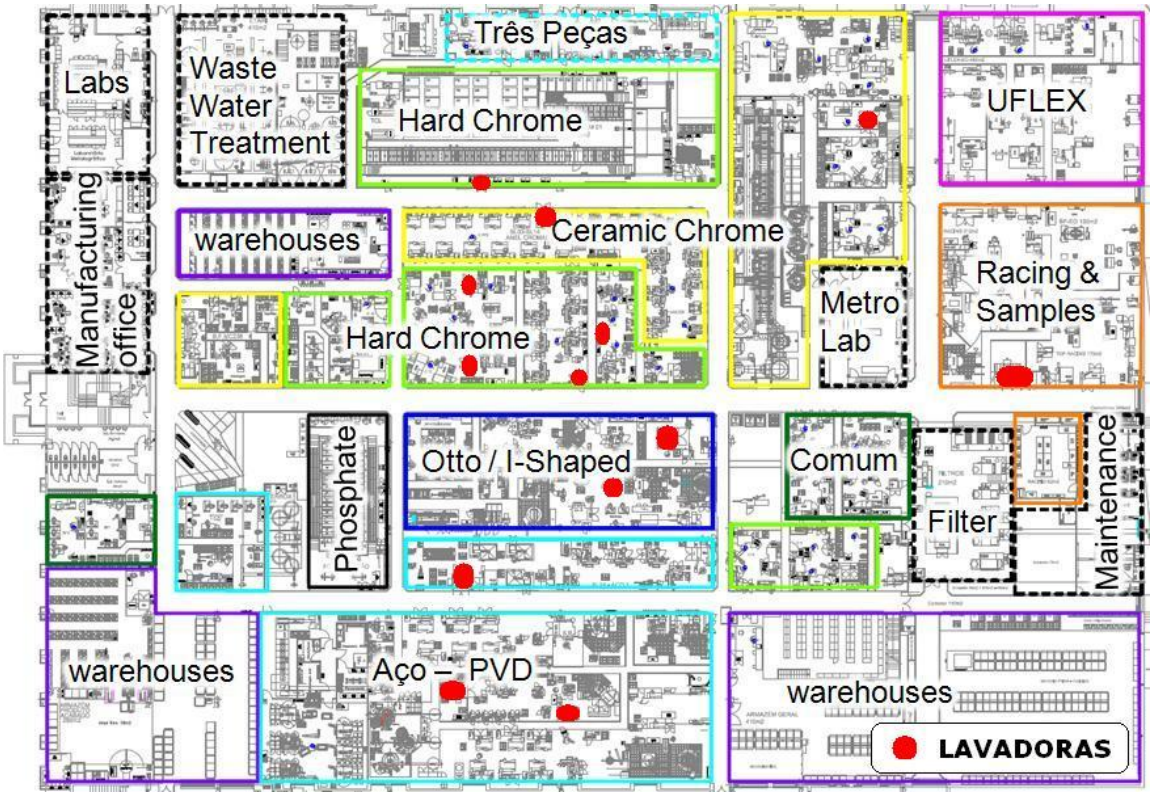
Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research* .

Müller, H. K., & Nau, B. S. (1998). Chapter 10 - Piston Rings. In H. K. Müller, & B. S. Nau, *Fluid Sealing Technology* (pp. 175-195). New York: Marcel Dekker, Inc.

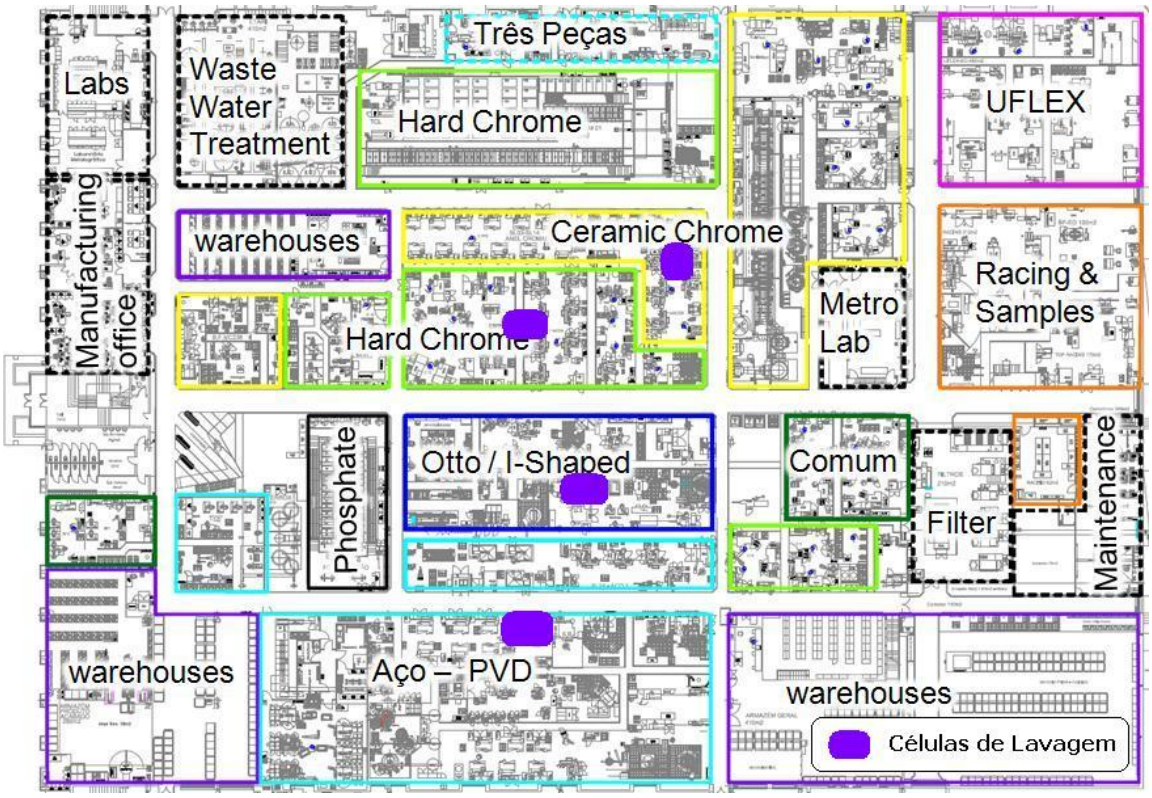
Nearchou, A. C. (2010). Maximizing production rate and work load smoothing in assembly lines using particle swarm optimization. *International Journal of Production Economics* .

Potts, C. N., & Whitehead, J. D. (2000). Workload Balancing and Loop Layout in the Design of a Flexible Manufacturing System. *European Journal of Operational Research* .

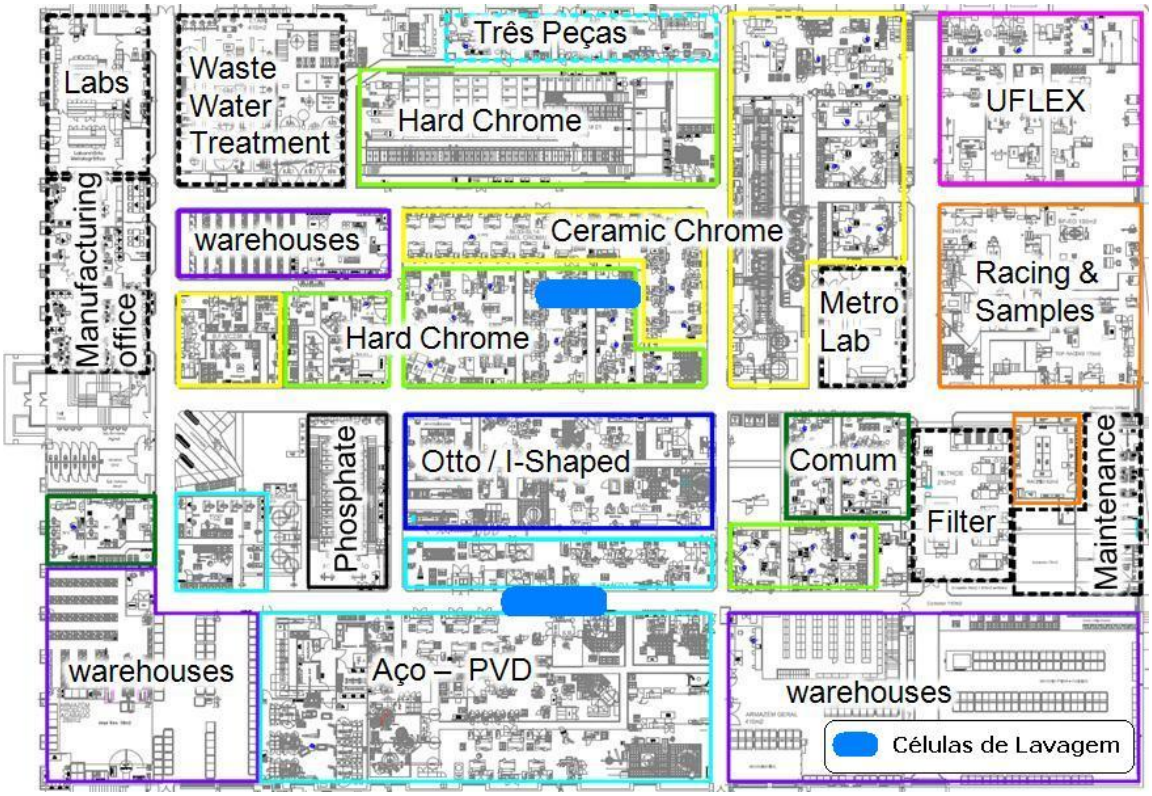
ANEXO A



A.1. - Cenário A - Localização das lavadoras



A.2. - Cenário B - Localização das células de lavagem



A.3. - Cenário C - Localização das células de lavagem.

ANEXO B

			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
			LAV-03	LAV-04	LAV-05	LAV-06	LAV-08	LAV-09	LAV-10	LAV-15	LAV-16	LAV-18	LAV-19	LAV-25	LAV-30
Aço - PVD	O1	Alivio Tensões	19,20	15,75	11,10	14,65	11,90	12,60	17,35	7,80	3,10	6,40	7,90	14,60	9,20
	O2	Bombeamento	17,40	12,15	7,50	10,50	8,70	8,30	13,40	3,20	2,00	3,00	4,70	15,00	6,60
	O3	Nitretação Gasosa	21,50	15,50	11,15	13,00	12,90	10,70	16,00	4,50	3,90	1,60	8,90	19,90	10,90
	O4	Folga 100%	18,10	10,80	7,10	8,00	9,20	5,80	11,00	1,50	6,25	3,90	6,20	17,90	8,10
	O5	Lapidação	18,70	13,65	9,10	11,90	10,40	9,60	14,80	4,10	0,80	2,50	6,20	16,00	8,05
Otto / I-Shaped	O6	Alivio Tensões	11,65	8,20	4,00	8,15	4,00	6,80	10,20	6,70	7,20	8,45	1,70	10,10	1,30
	O7	Retifica Lateral	12,00	8,00	3,65	7,70	4,00	6,30	9,90	6,20	7,00	8,05	1,10	10,60	1,35
	O8	Bombeamento	13,90	6,60	2,90	4,40	5,20	2,20	7,30	4,25	8,10	7,20	3,60	14,80	4,80
	O9	Nitretação Gasosa	21,50	15,50	11,15	13,00	12,90	10,70	16,00	4,50	3,90	1,60	8,90	19,90	10,90
	O10	Folga 100%	15,30	7,90	4,30	5,20	6,60	3,00	8,25	3,20	7,60	6,20	4,50	16,00	6,00
Hard Chrome	O11	Retifica Lateral	8,70	5,55	3,20	6,80	1,30	6,35	8,00	9,00	10,40	11,30	4,00	9,10	2,05
	O12	Bomb./Lapid.	12,35	4,00	3,05	1,25	4,70	1,30	4,20	7,35	11,25	10,30	5,80	15,10	6,00
	O13	Freza Fendas 01	14,40	6,00	4,30	2,65	6,40	1,20	5,60	6,10	10,60	9,10	6,25	16,65	7,00
	O14	Freza Fendas 02	13,30	14,60	5,10	1,20	6,60	2,50	3,50	8,40	12,80	11,40	7,80	16,90	8,00
	O15	Ret. Topo	11,80	3,20	3,35	0,75	4,70	2,00	3,30	8,15	12,00	11,20	6,40	15,00	6,40
	O16	Mandrilamento	12,60	4,50	2,60	2,00	5,50	0,70	4,90	6,60	10,50	9,60	5,15	14,85	5,50
Ceramic Chrome	O17	Retifica Lateral	4,65	4,25	7,40	7,70	5,60	9,00	6,40	14,10	16,40	16,80	9,85	10,90	8,15
	O18	Bombeamento	9,00	2,70	2,30	4,00	1,70	4,30	5,00	9,00	11,70	11,70	5,20	11,70	4,15
	O19	Retifica de Topo	0,70	8,00	10,30	11,50	8,20	12,50	10,20	17,00	18,50	19,40	12,15	8,80	10,20
	O20	RTZ	11,50	2,60	1,55	1,50	5,80	3,70	1,50	9,90	13,90	12,90	8,10	15,70	7,80
	O21	Lapidação	9,20	2,30	2,30	6,00	0,70	5,50	7,40	8,35	10,10	10,75	3,50	10,00	1,90
	O22	Mandrilamento	7,65	4,30	3,40	6,20	1,20	6,20	6,90	9,90	11,80	12,40	5,30	9,50	3,45

B.1. - Cenário A – Matriz de distâncias (unidades de distância)

			Células			
			1	2	3	4
Aço - PVD	O1	Alivio Tensões	14,60	13,10	5,80	8,70
	O2	Bombeamento	11,40	9,10	1,20	5,10
	O3	Nitretação Gasosa	15,10	12,00	4,40	8,90
	O4	Folga 100%	10,90	7,25	3,60	5,50
	O5	Lapidação	12,90	10,50	2,35	6,60
Otto / I-Shaped	O6	Alivio Tensões	6,75	6,40	5,70	2,80
	O7	Retifica Lateral	6,65	6,00	5,25	2,20
	O8	Bombeamento	6,60	3,15	5,15	2,40
	O9	Nitretação Gasosa	15,10	12,00	4,40	8,90
	O10	Folga 100%	8,00	4,30	4,60	8,80
Hard Chrome	O11	Retifica Lateral	3,75	5,25	8,50	4,30
	O12	Bomb./Lapid.	4,80	0,80	8,30	4,70
	O13	Freza Fendas 01	6,80	2,70	7,50	5,00
	O14	Freza Fendas 02	6,00	2,70	9,70	6,60
	O15	Ret. Topo	4,25	1,05	9,10	5,30
	O16	Mandrilamento	5,00	0,95	7,50	4,00
Ceramic Chrome	O17	Retifica Lateral	3,40	7,45	14,10	9,50
	O18	Bombeamento	1,70	2,80	9,20	4,65
	O19	Retifica de Topo	6,80	10,90	16,60	12,20
	O20	RTZ	4,40	2,80	10,90	7,10
	O21	Lapidação	3,50	4,40	8,00	3,60
	O22	Mandrilamento	2,40	4,90	9,60	5,20

B.2. - Cenário B – Matriz de distâncias (unidades de distância)

			Células	
			1	2
Aço - PVD	O1	Alivio Tensões	13,40	4,85
	O2	Bombeamento	10,50	1,20
	O3	Nitretação Gasosa	13,30	4,50
	O4	Folga 100%	8,75	2,90
	O5	Lapidação	11,50	2,70
Otto / I-Shaped	O6	Alivio Tensões	5,65	3,90
	O7	Retifica Lateral	5,50	3,60
	O8	Bombeamento	4,50	4,65
	O9	Nitretação Gasosa	13,30	4,50
	O10	Folga 100%	5,85	4,00
Hard Chrome	O11	Retifica Lateral	2,85	7,00
	O12	Bomb./Lapid.	2,30	7,80
	O13	Freza Fendas 01	4,40	6,95
	O14	Freza Fendas 02	3,80	9,20
	O15	Ret. Topo	1,90	8,65
	O16	Mandrilamento	2,60	7,05
Ceramic Chrome	O17	Retifica Lateral	5,10	13,10
	O18	Bombeamento	0,50	8,40
	O19	Retifica de Topo	7,60	15,00
	O20	RTZ	2,80	10,40
	O21	Lapidação	2,50	6,65
	O22	Mandrilamento	1,70	8,30

B.3. - Cenário C – Matriz de distâncias (unidades de distância)