



PEDRO JOSÉ ORNELAS FREITAS

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Análise da conceção de uma linha de secagem de
resíduos florestais para produção de *pellets*

Análise da conceção de uma linha de secagem de resíduos florestais para produção de *pellets*

PEDRO JOSÉ ORNELAS FREITAS

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor João Manuel Vicente Fradinho,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologias
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor António José Freire Morão, Professor Associado na
Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Vogais: Doutor Gabriel Marques Duarte dos Santos, Professor Auxiliar na
Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa
Doutor João Manuel Vicente Fradinho, Professor Auxiliar na
Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Agosto, 2024

Análise da conceção de uma linha de secagem de resíduos florestais para produção de pellets

Copyright © Pedro José Ornelas Freitas, 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.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Fradinho, pela sua ajuda ao longo deste trabalho. A sua disponibilidade e os conselhos transmitidos tiveram uma grande importância em todo este projeto. A todos os colaboradores da Reginacork, empresa onde passei os últimos meses, durante a realização desta dissertação, pela sua disponibilidade e ajuda relativamente ao funcionamento da fábrica. Em especial ao Sr. Carlos Garcia por me ter recebido na sua empresa. Por último agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e a todos os professores e auxiliares que me acompanharam durante a minha formação.

Resumo

Ao longo do tempo, a indústria tem desenvolvido e adaptado vários processos de modo a ultrapassar desafios à produtividade. Esta adaptação tem como base, o conhecimento empírico adquirido ao longo dos anos. Contudo as linhas de produção não são infalíveis, pelo que existe sempre a necessidade de melhorar os processos envolvidos e assim conferir uma melhoria na eficiência dos mesmos.

Em Portugal, o tratamento de materiais como aparas de madeira, serrim, rama e de troncos, para a produção de *pellets*, é uma atividade teve início há décadas. Porém, poucos foram os avanços neste sector da indústria, daí poder-se afirmar que se encontra estagnado. Dito isto, o objetivo primário deste documento é identificar os pontos fracos numa linha de tratamento de biomassa numa fábrica de *pellets* ao empregar tanto a Teoria Axiomática de Projeto e uma metodologia vocacionada para a manutenção do equipamento utilizado, conhecida como Design for Maintainability (projeto para a manutenibilidade).

Este documento irá conter a análise de um projeto de uma linha de secagem de matéria florestal, responsável pela eliminação da humidade em excesso na matéria-prima destinada à produção de *pellets*. Posteriormente serão apresentadas possíveis sugestões para as fragilidades detetadas.

Palavras chave: *Design for Maintainability*, Secagem, Linhas de Produção, *Pellets*, Resíduos Florestais, Biomassa, Teoria Axiomática de Projeto.

Abstract

Throughout time, engineers have been adapting old processes and developing new ones to serve their purposes and as such this continuous adaptation process sits firmly on the collective empiric knowledge acquired over the years by various entities. Therefore, any project developed until now and to be conceived in the future isn't beyond improvement.

In Portugal, the processing of raw materials such as wood scraps, saw dust and branches, is a decades old industry but unfortunately, very few breakthroughs have been made in regards to the techniques utilized and as such, this sector could be called stagnant. Having said this, the primary objective of this document is to correctly identify the weak points in an existing biomass processing and pellet producing facility by utilizing both Axiomatic Design Theory and a methodology geared towards maintaining the equipment employed, known as Design for Maintainability.

This document shall contain the analysis of an existing project and functioning of a biomass drying line, responsible for eliminating the excess moisture from the raw materials utilized in the production of pellets. Lastly, an array of possible solutions to the weak points identified will be presented.

Keywords: Design for Maintainability, Drying, Production Lines, *Pellets*, Forest Residues, Biomass, Axiomatic Design.

Índice

Agradecimentos.....	vi
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas.....	xv
Glossário	xvi
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	2
2 O processo de peletização	3
2.1 A Empresa.....	3
2.2 Pré-processamento da matéria-prima.....	5
2.3 <i>Pellets</i> de madeira	7
2.4 Produção de <i>pellets</i>	9
2.5 Desafios à produção	13
3 Teoria Axiomática de Projeto	15
3.1 Domínios.....	15
3.1.1 Domínio do cliente	17
3.1.2 Domínio funcional.....	18
3.1.3 Domínio físico	18
3.1.4 Domínio do processo	19
3.2 Axiomas	19
3.2.1 Axioma da Independência	19
3.2.2 Projeto desacoplado	20
3.2.3 Projeto desacoplável	20
3.2.4 Projeto acoplado	21

3.2.5 Axioma da Informação	22
3.3 Projeto Robusto vs Projeto Redundante	24
4 <i>Design for Maintainability</i>	25
4.1 Tipos de manutenção	28
4.2 Teoremas.....	30
5 Metodologia proposta.....	35
5.1 Definir o projeto.....	36
5.2 Analisar o projeto.....	36
5.3 Identificar os defeitos presentes no projeto	37
5.4 Melhorar o projeto	38
5.5 Garantir o controlo do sistema projetado.....	39
6 Análise da linha de secagem segundo a Teoria Axiomática de Projeto	41
6.1 Nível I	42
6.2 Nível II	43
6.3 Nível III.....	46
6.4 Nível IV	58
6.5 Nível V	65
6.6 Nível VI	75
6.7 Solução para maior independência	77
7 Análise da linha de secagem segundo o DfM	81
7.1 Possíveis soluções de acordo com o DfM.....	86
7.2 Outras soluções	92
8 Aplicação da metodologia proposta	98
9 Conclusões e trabalhos futuros.....	103
Bibliografia	105
Anexos	109

Índice de Figuras

Figura 2.1: Vista aérea da empresa [1]	3
Figura 2.2: Zona construída para a produção de <i>pellets</i>	4
Figura 2.3: Rolaria empilhada no recinto [3].....	5
Figura 2.4: Armazenamento de estilha [3].	5
Figura 2.5: Diferentes secções da fábrica [3].	6
Figura 2.6: Cunha hidráulica[3].....	6
Figura 2.7: Secador utilizado na fábrica [3]	7
Figura 2.8: Fornalha desativada[3].....	9
Figura 2.9: <i>Big Bags</i> com pó de cortiçados prontos a serem utilizados na alimentação das fornalhas [1] [3].....	10
Figura 2.10: Fluxograma simplificado das operações realizadas na fábrica [3].....	11
Figura 2.11: <i>Big Bags</i> à esquerda e sacos standardizados de 15 quilogramas. Ambos utilizados no armazenamento de pellets [3].....	11
Figura 3.1: Os vários domínios da teoria axiomática, adaptada de [9].....	16
Figura 3.2: Exemplo de como uma necessidade do cliente pode ser traduzida em vários requisitos funcionais [3]	17
Figura 3.3: Vários níveis do diagrama em árvore resultante da decomposição dos requisitos e parâmetros [3].	18
Figura 3.4: Componentes do axioma da informação, adaptado de [7]	23
Figura 4.1: Mais valias associadas à manutenção corretiva, adaptada de [14].....	29
Figura 5.1: Cinco etapas da metodologia apresentada.....	35
Figura 5.2: Interação entre a terceira e quarta etapas	37
Figura 5.3: Aspetos do sistema responsáveis pela suas variações	38
Figura 5.4: Teoremas utilizados na melhoria do plano de manutenção.....	39
Figura 6.1: Diagrama do equipamento responsável pelo pré-processamento da matéria-prima.....	40

Figura 6.2: Diagrama de árvore generalizado.....	41
Figura 6.3: Diagrama de árvore inicial.	44
Figura 6.4: Fluxograma da progressão dimensional da matéria-prima	46
Figura 6.5: Filtro de mangas na fábrica e componentes individuais, adaptado de [19]	49
Figura 6.6: Percursos da biomassa e do combustível nas duas linhas de secagem iniciais.....	50
Figura 6.7: Máquina escavadora utilizada no transporte da biomassa	51
Figura 6.8: Diagramas de árvore parciais com início no nível II e fim no nível III	56
Figura 6.9: Moinho de martelos com retenção de pedras [18].	58
Figura 6.10: Vista frontal de uma fornalha	60
Figura 6.11: Vista lateral de uma fornalha	61
Figura 6.12: Válvula guilhotina pneumática [20].	63
Figura 6.13: Diagramas de árvore parciais com início no nível II e fim no nível IV	63
Figura 6.14: Compressor utilizado para garantir o caudal de ar.	65
Figura 6.15: Entrada do secador [21]	68
Figura 6.16: Vista lateral de um corte de um secador de tambor rotativo [21].	69
Figura 6.17: Ciclones em paralelo.....	70
Figura 6.18: Cinza recolhida.	71
Figura 6.19: Estação de limpeza e filtragem.	71
Figura 6.20: Diagramas de árvore parciais das ramificações do FR1.1.6 e do DP1.1.6.	72
Figura 6.21: Estrutura simplificada de um <i>Wet Scrubber</i>	74
Figura 6.22: Diagramas de árvore parciais dos elementos numerados 1.1.6, com início no nível III e fim no nível VI.....	74
Figura 6.23: Diagramas de árvore completos	75
Figura 7.1: Crivo desativado. Este é igual àquele utilizado atualmente na fábrica	80

Figura 7.2: Silo e crivo (assinalado com um contorno verde)	81
Figura 7.3: Motor de indução e elementos motores do secador colocados num dos flancos do secador.	82
Figura 7.4: Requisitos inerentes à criação de um plano de manutenção	88
Figura 7.5: Vista aérea da empresa, destacando-se as zonas de interesse, [24].....	91
Figura 8.1: Configuração de uma linha de secagem segundo as sugestões apresentadas. O asterisco (*) representa a presença de elementos extraordinários ao projeto original.....	96
Figura 8.2: Diagrama do sistema de pesagem e dosagem de biomassa a equipar nos silos das linhas de secagem.....	96
Figura 8.3: Planta proposta.....	97
Figura 8.4: Equipamento proposto para o transporte da biomassa.....	98

Índice de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros associados aos três tipos pellets [4].	8
Tabela 2: Categorias correspondentes aos problemas que serão detetadosatravés da análise segundo DfM.	36
Tabela 3: Vários tipos de matéria-prima aceite para a produção dos três tipos de pellets creditados pela ENplus [5].	43
Tabela 4: Registo de valores médios, dos parâmetros da produção, para omês de janeiro de 2024.	54
Tabela 5: Resumo da adesão ou ausência dos princípios do DfM nos vários dispositivos da linha de secagem	84
Tabela 6: Resumo dos problemas identificados através do DfM e soluções apresentadas.....	89
Tabela 7: Tabela resumo das propostas apresentadas no subcapítulo 7.1.....	94

Glossário

AD – “*Axiomatic Design*”, Teoria Axiomática de Projeto.

DfM – “*Design for Maintainability*”.

CN – “*Customer Needs*”, Necessidades do Cliente.

FR – “*Functional Requirements*”, Requisitos Funcionais.

DP – “*Design Parameters*”, Parâmetros do Projeto.

PV – “*Process Variables*”, Variáveis do Processo.

1 Introdução

A biomassa, apesar de ser uma das fontes de energia mais antigas disponíveis à humanidade, nunca foi a mais eficiente. O uso de carvão e mais recentemente, a descoberta e uso de petróleo reduziram a biomassa a uma fonte secundária de energia. O seu potencial energético é especialmente reduzido quando comparado ao dos combustíveis fósseis. Porém, a preocupação em reduzir o impacto que a indústria tem no meio ambiente, especialmente na Europa, faz com que a biomassa se torne uma alternativa atrativa [1].

Esta é muitas vezes adquirida como subproduto, principalmente na agricultura e na silvicultura, pelo que o seu uso permite reduzir o desperdício associado a estas atividades e ao mesmo tempo permite mitigar a sua pegada ecológica. Outros aspetos a considerar são as exigências energéticas atuais e os aumentos sucessivos do preço dos combustíveis fósseis [2][3].

De modo a facilitar o seu uso na produção de energia, desenvolveram-se várias técnicas de compactação, entre elas destaca-se a peletização. Com esta técnica, a biomassa assume uma forma cilíndrica, densa e homogénea. Estas características conferem um aumento no rendimento energético [1][2].

Houve numa expansão considerável do mercado das *pellets*, primeiramente no centro e norte europeus por volta da década de 90 e só depois no sul da Europa, após 2010. Em Portugal, apesar do uso da biomassa como fonte de energia ser uma prática comum, só a partir de 2015 é que se iniciou a produção de *pellets* em grandes quantidades. A produção portuguesa inicialmente teve como objetivo exportar para o estrangeiro, nomeadamente para países como a Suécia, Noruega e Reino Unido, tendo-se registado também um aumento substancial no consumo de *pellets* para uso doméstico a nível nacional [2][25].

Apesar da pesquisa contínua e do desenvolvimento bem como a implementação de novos métodos e tecnologias no setor industrial com o intuito de melhorar a eficiência e a produtividade dos processos responsáveis pela produção de um determinado produto, a indústria da madeira e das *pellets* assenta, na maioria dos casos, sobre conhecimento empírico, ignorando bases teóricas.

1.1 Motivação

Com o intuito de melhor compreender os métodos e a maquinaria empregue na indústria das *pellets*, o autor deste documento visitou as instalações da Regina Cork. Nestas, acompanharam-se os dois chefes de turno durante as suas tarefas diárias e procedeu-se à investigação das várias etapas da produção. A informação recolhida será refletida neste documento. Desta forma, o documento não só irá incidir sobre o funcionamento do equipamento utilizado, mas também sobre a sua manutenibilidade e confiabilidade.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo primário a elaboração de uma metodologia para a implementação de uma linha de secagem de biomassa. Para este efeito será estudado o projeto da secção de secagem numa linha de produção de *pellets* à luz da Teoria Axiomática de Projeto e segundo o *Design for Maintainability* (DfM). Nesta análise serão identificados os problemas à produção atuais e finalmente serão apresentadas possíveis soluções para os mesmos e opções alternativas.

Por fim será apresentado um possível *layout* para fábrica, mais precisamente da nova linha de secagem e no qual serão apontadas as alterações provenientes da análise feita. A informação apresentada nesta tese provém da informação e conhecimentos adquiridos na Regina Cork e da experiência dos vários técnicos e engenheiros envolvidos no processo de produção de *pellets*.

2 O processo de peletização

As *pellets*, de uma forma simplificada, constituem um conjunto de produtos com uma geometria cilíndrica, compostos por material orgânico vegetal comprimido e cujo uso primário é a obtenção de energia térmica através da sua combustão. Este produto surge como um complemento ao uso dos combustíveis tradicionalmente utilizados na indústria, contudo destaca-se dos demais pois pode ser produzido com detritos e resíduos provenientes da indústria da madeira e da cortiça.

2.1 A Empresa

A Reginacork iniciou a sua atividade comercial na produção de granulados de cortiça em 1994. Esta empresa está situada em Pinhal Novo, mais precisamente na Herdade do Monte Novo (figura 2.1).



Figura 2.1: Vista aérea das instalações da empresa.

Apostando na melhoria contínua de produtos e processo, é certificada pela norma ISO 9001:2015 bem como na ENplus® 1001:2022.

Já em 2018, a empresa iniciou a produção de *pellets* de madeira, não só como forma de diversificar os seus produtos, mas também pela potencialidade de reaproveitamento

dos desperdícios na produção dos triturados de cortiça e dos resíduos florestais existentes visto que permite aproveitar uma fatia significativa do material recolhido no campo, tornando as *pellets* um complemento à indústria da cortiça. A figura 2 ilustra a área dedicada à produção de pellets.



Figura 2.2: Zona construída para a produção de pellets [23].

A recolha da matéria-prima é feita por uma empresa subsidiária, a Rck-Pellets Lda.

Atualmente ambas as empresas empregam um número total de 62 colaboradores divididos entre a linha de produção, a administração, a equipa técnica, a equipa de manutenção e a equipa responsável pela aquisição da matéria-prima.

Durante as visitas à fábrica, o autor deste documento acompanhou tanto a equipa técnica como os responsáveis pela manutenção da fábrica.

2.2 Pré-processamento da matéria-prima

Os quatro tipos de biomassa recolhidos e utilizados na produção de *pellets* são os seguintes:

- Rolaria – Nome atribuído aos elementos que apresentam grandes dimensões provenientes da desflorestação, como os troncos, e que muitas vezes necessitam de uma etapa adicional no pré-processamento da matéria-prima para homogeneizar a sua geometria. A figura 2.3 permite a visualização de este tipo de elementos.

- Estilha – Este material consiste em pequenos fragmentos de madeira triturada, cujas dimensões estão compreendidas entre os 3 e 10 cm de comprimento. Contudo o diâmetro deste varia muito. Figura 2.4.



Figura 2.3: Rolaria empilhada no recinto.



Figura 2.4: Armazenamento de estilha.

- Serrim – À semelhança da estilha, são também fragmentos de madeira de pequenas dimensões, contudo o diâmetro apresentado não é só menor, mas também é mais uniforme (figura 2.5).



Figura 2.5: Amostra de serrim.

- Rama – Material verde da desflorestação. É a que precisamente apresenta níveis de humidade mais elevados e, por esta mesma razão, terão que ser processados à parte dos demais (figura 2.6).



Figura 2.6: Rama disposta no recinto da fábrica.

Na figura 2.7 é possível observar o local de armazenamento dos elementos descritos anteriormente enquanto que aguardam pelo próximo passo do processo.

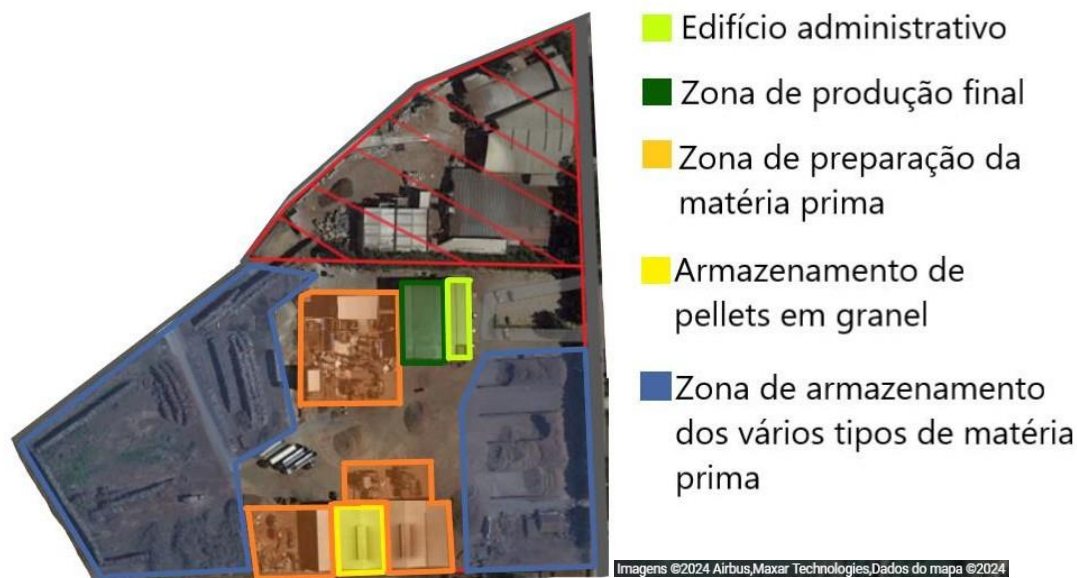


Figura 2.7: Diferentes secções da fábrica, adaptado de [23].

A preparação da matéria-prima é conseguida em três fases distintas, feitas nos módulos correspondentes. Estes são o módulo de entrada, de secagem e de saída.

2.3 Pellets de madeira

Dada a expansão do mercado de *pellets* para o uso doméstico, tanto a nível nacional como internacional foi criada uma marca que funciona como esquema de qualidade de *pellets* através de requisitos mínimos e permite a certificação das entidades produtoras ou distribuidoras de *pellets*, a ENplus®. Esta marca distingue dois tipos de pellets, aquelas destinadas para uso industrial (ENplus B) e aquelas destinadas para uso doméstico (ENplus A1 e ENplus A2).

O uso doméstico distingue-se do uso industrial no que toca às características do produto final. Para o uso doméstico, a redução de cinzas e a diminuição dos níveis de nitrogénio e de enxofre são priorizadas.

Já a produção para uso industrial permite valores mais elevados para certos parâmetros

como por exemplo, a quantidade de cinzas produzidas pela combustão. Isto porque a acumulação deste tipo de resíduos é contemplada aquando da conceção e implementação de fornalhas industriais, que são desenvolvidas de modo a evitar avarias resultantes da acumulação destes resíduos.

Parâmetros normalizados, como por exemplo, a composição química relacionada com os tipos de *pellets* considerados pela ENplus® encontram-se na tabela 1. A fábrica está creditada a produzir os primeiros dois tipos de *pellets*, A1 e A2.

Tabela 1: Parâmetros associados aos três tipos pellets [4].

Property	Unit	ENplus A1	ENplus A2	ENplus B	Testing standard ¹¹⁾
Diameter	mm	6 ± 1 or 8 ± 1			ISO 17829
Length	mm	3,15 < L ≤ 40 ⁴⁾			ISO 17829
Moisture	w-% ²⁾	≤ 10			ISO 18134
Ash	w-% ³⁾	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Mechanical Durability	w-% ²⁾	≥ 98,0 ⁵⁾	≥ 97,5 ⁵⁾		ISO 17831-1
Fines (< 3,15 mm)	w-% ²⁾	≤ 1,0 ⁶⁾ (≤ 0,5 ⁷⁾)			ISO 18846
Temperature of pellets	°C	≤ 40 ⁸⁾			
Net Calorific Value	kWh/kg ²⁾	≥ 4,6 ⁹⁾			ISO 18125
Bulk Density	kg/m ^{3 2)}	600 ≤ BD ≤ 750			ISO 17828
Additives	w-% ²⁾	≤ 2 ¹⁰⁾			-
Nitrogen	w-% ³⁾	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	ISO 16948
Sulfur	w-% ³⁾	≤ 0,04	≤ 0,05		ISO 16994
Chlorine	w-% ³⁾	≤ 0,02		≤ 0,03	ISO 16994
Ash Deformation Temperature ¹⁾	°C	≥ 1200	≥ 1100		CEN/TC 15370-1
Arsenic	mg/kg ³⁾	≤ 1			ISO 16968
Cadmium	mg/kg ³⁾	≤ 0,5			ISO 16968
Chromium	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Copper	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Lead	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Mercury	mg/kg ³⁾	≤ 0,1			ISO 16968
Nickel	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Zinc	mg/kg ³⁾	≤ 100			ISO 16968

¹⁾ ash is produced at 815 °C

²⁾ as received

³⁾ dry basis

⁴⁾ a maximum of 1% of the pellets may be longer than 40mm, no pellets longer than 45mm are allowed.

⁵⁾ at the loading point of the transport unit (truck, vessel) at the production site

⁶⁾ at factory gate or when loading truck for deliveries to end-users (*Part Load Delivery* and *Full Load Delivery*)

⁷⁾ at factory gate, when filling pellet bags or sealed *Big Bags*.

⁸⁾ at the last loading point for truck deliveries to end-users (*Part Load Delivery* and *Full Load Delivery*)

2.4 Produção de *pellets*

A estilha e o serrim são os dois elementos da biomassa, que à chegada, estão prontos para serem secos. Estes são alimentados ao crivo através de um transportador de parafuso sem-fim, após serem depositados num silo que, por sua vez é alimentado pelos colaboradores com uso de uma máquina escavadora.

As impurezas como areias e seixos de dimensões muito reduzidas são aprisionados na base do crivo, enquanto que todos os elementos com diâmetro inferior a 15 mm, mas superior a 3 mm são direcionados para o passo seguinte.

Os elementos com dimensão inferior a 15 mm são conduzidos até um moinho de martelos. Este é designado como moinho "verde" por apenas triturar biomassa húmida (figura 2.8). Esta operação gera uma quantidade considerável de pó que é extraído do moinho por um sistema de transporte pneumático e é direcionado para um filtro de mangas.



Figura 2.8: Moinho "verde".

No caso da rolaria de grandes dimensões, é necessário dividir os troncos em elementos de dimensões menores, de modo a possibilitar a sua trituração. Só após serem prensados contra uma cunha por meio de um pistão hidráulico e serem divididos em dois é que é possível garantir uma trituração inicial dos mesmos e evitar estragos nas trituradoras. O mecanismo responsável pelo processamento dos troncos encontra-se

ilustrado na figura 2.9. Uma vez concluído este processo, obtém-se estilha a partir dos troncos.



Figura 2.9: Rachador hidráulico.

Já a secagem dos vários tipos de matéria-prima é conseguida através de duas linhas separadas. Nestas a matéria-prima e o ar quente passam por secadores cilíndricos à semelhança do secador apresentado na figura 2.10. O ar quente é injetado por uma condutano topo do cilindro e conseguido no local através da combustão de pó de cortiça em fornalhas próprias, figura 2.11. Este comburente, tal como foi mencionado anteriormente, provém do setor adjacente da cortiça. Idealmente a matéria-prima sai do secador com uma humidade relativa de cerca de 11%.

Como o ar quente é gerado na fornalha, é acompanhado dos produtos da combustão que não podem ser misturados com a biomassa. Por isso o ar, antes de ser conduzido até o secador, é filtrado de modo a expurgar os óxidos produzidos na fornalha, principalmente cinzas. Para este efeito é utilizado um par de ciclones montados à saída de cada fornalha.

Uma vez concluída a secagem, o material seco, é sujeito a uma nova trituração de modo a reduzir o seu diâmetro para valores iguais ou inferiores a 4 mm. É de notar também que esta trituração acaba por consumir menos energia e é mais rápida que a aquela efetuada na fase inicial do tratamento da matéria-prima. Isto deve-se ao facto de que o material triturado nesta fase da produção ao conter menos água, algo que promove a sua fragmentação.



Figura 2.10: Secador utilizado na fábrica.

Em seguida, este material selecionado é depositado em silos, que por sua vez, irão alimentar, por meio de dois transportadores de parafuso sem-fim, as prensas responsáveis pela aglomeração da biomassa seca em *pellets*.

A peletização é realizada em duas etapas: pressionar o material e forçá-lo a passar através de uma matriz rotativa por ação de um punção.

Os movimentos rotativos das matrizes combinados com a posição de uma lâmina estacionária fazem com que as *pellets* sejam depositadas no funil com as dimensões corretas. É nesta fase que as amostras são extraídas para testagem e controlo de qualidade por comparação às especificações ENplus®.



Figura 2.11: Fornalha desativada.

Antes das *pellets* prosseguirem para um silo ventilado, são depositadas num segundo crivo de modo a assegurar que o produto possui as dimensões corretas. As *pellets* não conformes são, por ação do crivo, separadas e redirecionadas novamente para a linha produção.

É também possível observar na figura 2.12, que o fluxo de pó pode ser direcionado para cada um dos silos que alimentam as fornalhas individualmente através de transportadores de parafuso sem-fim.

Como penúltima etapa do processo temos o arrefecimento das *pellets*, que como foi mencionado no parágrafo anterior, é conseguido ao deixar as *pellets* em repouso, num silo ventilado, durante cerca de 20 minutos, para que o empacotamento possa ser feito sem danificar as embalagens. A figura 2.13 representa um diagrama simplificado das operações envolvidas na produção de *pellets*.

O produto final tem vários destinos ao sair da linha de produção. É possível armazená-lo em sacos de 15 quilogramas e em *Big Bags* como ilustra a figura 2.14.



Figura 2.12: Big Bags com pó de cortiça prontos a serem utilizados na alimentação das fornalhas.

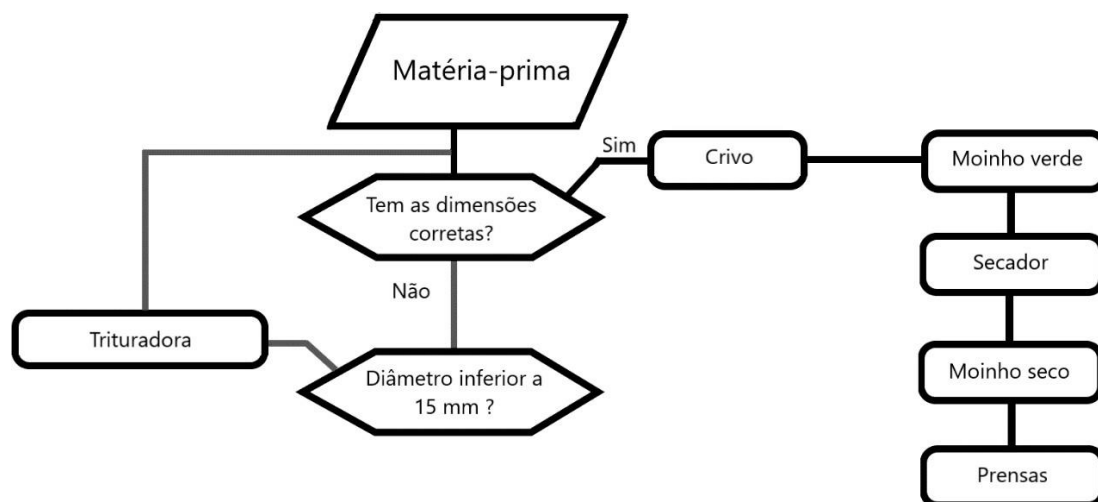


Figura 2.13: Fluxograma simplificado das operações realizadas na fábrica.



Figura 2.14: Big Bags à esquerda e sacos standardizados de 15 kg. Ambos utilizados no armazenamento de pellets.

2.5 Desafios à produção

O primeiro desafio à produção é evitar a combustão da matéria-prima.

Devido ao risco de incêndio, a linha de secagem possui um conjunto de sistemas de detecção e extinção de incêndios. O sistema de detecção é composto por vários sensores dispostos na fornalha, na entrada do secador e no transportador pneumático que o sucede. A extinção de possíveis incêndios é conseguida em simultâneo, através de um sistema de aspersores, distribuído ao longo das condutas de aspiração e de um sistema automático que redireciona o material em combustão para fora da linha de produção.

Outro desafio à produção envolve os níveis de humidade elevados durante os meses de Inverno e Primavera. Devido à precipitação recorrente durante este período, a matéria-prima que é recolhida bem como aquela que já se encontra no recinto da fábrica apresentam uma humidade relativa entre os 40% e 50%, o que implica um maior tempo de permanência nos secadores, limitando a quantidade de material disponível para a produção de *pellets*. Desta forma é possível afirmar que as condições climáticas conferem uma espécie de sazonalidade à quantidade de outputs da fábrica.

Sendo assim torna-se fácil identificar que o *bottleneck* no processo produtivo encontra-se precisamente no processo de secagem.

3 Teoria Axiomática de Projeto

A Teoria Axiomática de Projeto, desenvolvida por Nam Pyo Suh, visa proporcionar bases para o desenvolvimento de novos projetos e para a análise de projetos existentes. Assim o desenvolvimento de projetos torna-se um processo célere, isto é, são necessárias menos iterações até surgir um projeto robusto [6].

Finalmente, a AD (*Axiomatic Design*) permite, no caso de existirem vários projetos viáveis, determinar qual o melhor projeto entre aqueles apresentados [6].

O foco desta teoria é a formulação de objetivos claros e ao mesmo tempo eliminar ideias incompatíveis com os requisitos ou com os constrangimentos impostos ao projeto o mais cedo possível. Adicionalmente a decomposição desses mesmos requisitos nos seus elementos básicos permite ao engenheiro conceber soluções recorrendo a um leque amplo de ferramentas e conceitos de forma otimizada [6][7].

Dito isto, a abordagem axiomática assenta num conjunto de dois axiomas, oito corolários e vinte e seis teoremas. Destes, serão abordados em detalhe os axiomas bem como alguns dos teoremas e corolários nos subcapítulos que se seguem, porém, todos encontram-se anexados no final deste documento [7].

3.1 Domínios

Permitem compartimentar e focar o esforço criativo de um engenheiro de modo a que este aborde cada atividade inerente ao projeto de forma sistemática e aumentar a probabilidade de este conseguir responder às necessidades do cliente sem comprometer outros aspetos do projeto.

Na figura 3.1 estão apresentados os quatro domínios da AD e a sequência pela qual devem ser abordados. Neste esquema o domínio à esquerda representa a pergunta "o que é que se pretende atingir?" enquanto que o domínio diretamente à sua direita corresponde à resposta ao domínio que o precede, ou seja, "como atingir esse objetivo".

Cada domínio pode ser decomposto em vários níveis, em que um elemento de um dado nível origina pelo menos dois elementos no nível seguinte, isto é, o número de entradas para qualquer nível tem de ser maior que o número de entradas no nível que o precede. A especificidade do projeto aumenta com o número de níveis uma vez que um conjunto elementos, completamente independentes entre si, definem completamente o

elemento que o os precede na hierarquia do domínio.

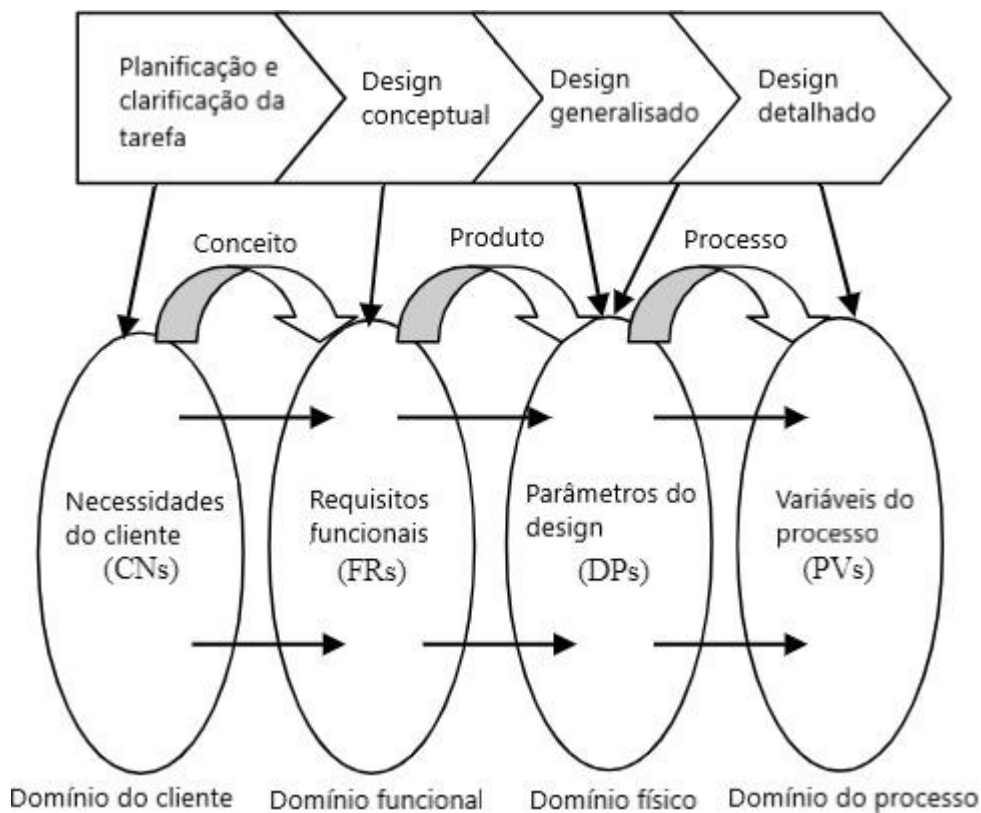


Figura 3.1: Os vários domínios da Teoria Axiomática [9].

- **Constrangimentos**

Embora a figura 3.1 não inclua os constrangimentos do sistema, estes devem ser considerados desde o início como limitações às escolhas de parâmetros. Assim, qualquer decisão sobre o sistema terá que necessariamente ser tomada em função destes constrangimentos.

Estes constrangimentos dividem-se em duas categorias distintas, os *inputs constraints*, cuja natureza advém do objetivo final do projeto e os *system constraints*, que são normalmente específicos a um tipo de projeto dado que resultam diretamente das decisões tomadas durante o desenvolvimento do mesmo. Por exemplo, ao desenvolver um motor para um dado tipo de automóvel, o engenheiro deverá considerar o tipo de combustível admitido no mesmo. Assim admite-se o tipo de combustível a ser utilizado

como *input constraint*. Um outro exemplo, mais comum, seria considerar o tipo de função que o projeto desempenha.

O custo associado à satisfação das necessidades do cliente (CN) também deve ser considerado como constrangimento, mais especificamente como um constrangimento inerente ao sistema pois é impossível considerá-lo como requisito funcional visto que este nunca poderá ser independente dos demais [6][7].

3.1.1 Domínio do cliente

Quando questionados, a grande maioria dos clientes, apresentam dificuldade na definição de atributos desejáveis no produto a desenvolver e por isso cabe ao projetista avaliar as prioridades dos clientes para melhor definir as características que são indispensáveis à satisfação do mesmo.

As características desejadas, identificadas como as necessidades do cliente (CN), servem como base à definição dos requisitos funcionais. A tradução destas necessidades para requisitos funcionais é feita de tal forma a permitir que uma necessidade possa originar várias funções [6]. Assim, um conjunto de requisitos funcionais pode apenas refletir uma das necessidades do cliente, como ilustra a figura 3.2. Esta relação entre o domínio do cliente e o domínio funcional é única – existe nas relações entre os domínios restantes uma vez que esta disparidade entre o número de entradas nestes domínios não contradiz o primeiro axioma, o axioma da Independência [6].

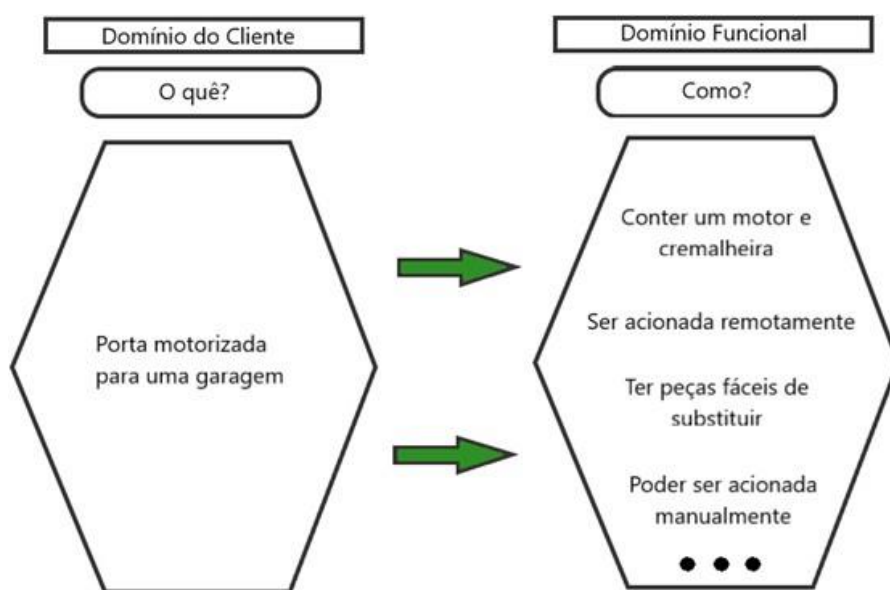


Figura 3.2: Exemplo de como uma necessidade do cliente pode originar vários requisitos funcionais.

3.1.2 Domínio funcional

Devem ser expressos de forma verbal e devem ser neutrais, ou seja, devem indicar as ações que se pretende alcançar e nunca como se irão alcançar.

Outro aspeto a considerar é a presença de fatores externos ao projeto e os objetivos deste, como por exemplo, variações nas condições ambientais de serviço, tempo de vida útil, variações nos modos de funcionamento do sistema e o nível de manutenção requerido para manter o sistema em condições ótimas. Todos estes devem ser considerados como requisitos funcionais do projeto [7][10].

Finalmente, estes devem ser sempre explicitados de forma neutra, imperativa e verbal.

3.1.3 Domínio físico

Neste inserem-se os parâmetros de projeto (DPs), que correspondem aos mecanismos que satisfazem os requisitos funcionais [7]. A transição de FRs em DPs é a fase mais extensa do projeto pois é nesta fase em que a decomposição dos elementos de cada domínio varia desde níveis intermédios até níveis de maior detalhe. Assim o processo de alternar entre ambos os domínios continua até o produto estar totalmente definido. Porém, a decomposição dos vários domínios não deve ser efetuada de forma isolada, esta deve ser efetuada através de um movimento de *zig zag* entre pares de domínios, figura 3.3.

Na figura 3.3 estão exemplificadas as ramificações que resultam do processo de *zigzag*. Esta ramificação está dividida em vários níveis que correspondem à especificidade das características do projeto.

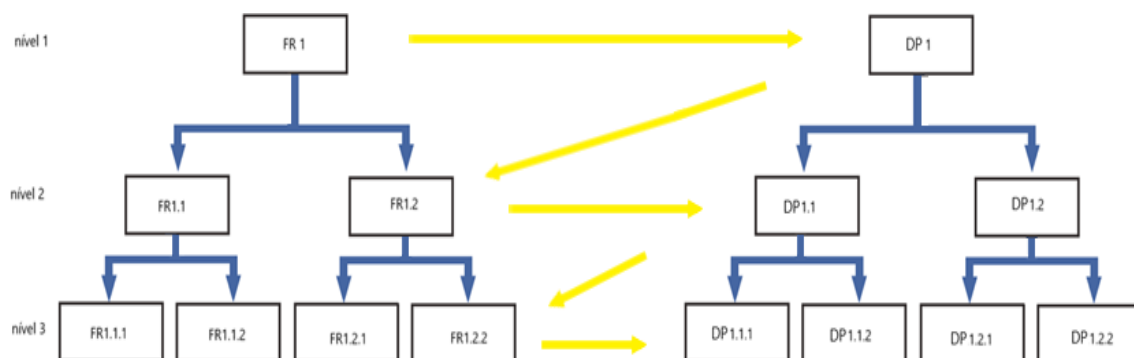


Figura 3.3: Vários níveis do diagrama em árvore resultante da decomposição dos requisitos e parâmetros [3].

3.1.4 Domínio do processo

Como último domínio, tem-se o domínio do processo que engloba todas as variáveis mensuráveis do projeto (PVs) e são responsáveis por caracterizar os processos que criam os DPs escolhidos.

Estas variáveis podem surgir de várias consoante o processo correspondente, como por exemplo, torque, velocidades, forças, amplitudes, passo, entre outras.

3.2 Axiomas

Os axiomas foram concebidos após identificar os elementos comuns aos bons projetos. Destes derivam os teoremas e corolários que por sua vez facilitam a adesão aos axiomas e ao mesmo tempo servem como guias ao desenvolvimento eficiente de projetos.

3.2.1 Axioma da Independência

É o primeiro critério quando um projeto é analisado à luz da axiomática e aplica-se nas fases de transição entre os domínios funcional, físico e do domínio do processo.

Segundo este, um FR não deve influenciar ou ser influenciado por outros do mesmo nível. Por outro lado, um FR só deve ser ajustado por um e só um DP para que o parâmetro em questão consiga ser melhorado sem comprometer as propriedades dos restantes. O mesmo é válido para os parâmetros de projeto e para as variáveis do processo.

De forma a melhor visualizar as relações entre domínios, estes podem ser representados através de vetores e a relação entre eles pode ser descrita pela equação 3.1. Nesta equação são utilizados os requisitos funcionais e os parâmetros de projeto [6].

Onde $[A]$, é designada de $[FR] = [A] * [DP]$ matriz de (3.1) projeto e é esta que caracteriza o sistema.

Assim, introduz-se a noção de projetos acoplados, desacopláveis e desacoplados.

3.2.2 Projeto desacoplado

Representa o objetivo final da aplicação da teoria axiomática pois é, conceptualmente, o projeto ideal e como tal respeita o Axioma da Independência em todos os instantes de ajuste. Tal como as expressões seguintes (3.2, 3.3, 3.4) indicam, cada requisito é influenciado por apenas um parâmetro e como tal é possível proceder à melhoria de um só elemento do projeto individualmente. Isto reduz drasticamente o número de iterações do projeto e o tempo de desenvolvimento do projeto [8].

A equação 3.5 é construída a partir das três equações anteriores. Esta exemplifica uma matriz com três FRs e os correspondentes três DPs e esta correspondente a um projeto desacoplado.

$$[FR_1] = [A_{11}] * [DP_1] \quad (3.2)$$

$$[FR_2] = [A_{22}] * [DP_2] \quad (3.3)$$

$$[FR_3] = [A_{33}] * [DP_3] \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Dado que um só FR corresponde a um DP, a matriz de projeto associada a projetos desacoplados terá que ser uma matriz diagonal, isto é, uma matriz cujos elementos que não aqueles da linha diagonal são elementos nulos [8].

3.2.3 Projeto desacoplável

Um projeto desacoplável é aquele que apresenta algumas dependências no conjunto de requisitos selecionados. Embora não seja ideal, é possível efetuar alterações, de magnitude variável, de modo a torná-lo um projeto desacoplado de modo a que um só FR seja afetado por um só DP.

Quanto ao aspeto da matriz do projeto, esta irá, inevitavelmente, assumir uma forma triangular, seja esta superior ou inferior. Sendo uma matriz triangular implica que existam elementos não nulos nas secções superiores ou inferiores à diagonal, o que por sua vez reflete a existência de dependências entre os elementos verticais ou entre os elementos

horizontais [8].

As equações 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 exemplificam, respetivamente, quais os DPs que influenciam cada FR e finalmente a forma matricial de um projeto desacoplável.

$$[FR_1] = [A_{11}] * [DP_1] + [A_{12}] * [DP_2] + [A_{13}] * [DP_3] + [A_{14}] * [DP_4] \quad (3.6)$$

$$[FR_2] = [A_{12}] * [DP_2] + [A_{13}] * [DP_3] + [A_{14}] * [DP_4] \quad (3.7)$$

$$[FR_3] = [A_{13}] * [DP_3] + [A_{14}] * [DP_4] \quad (3.8)$$

$$[FR_4] = [A_{14}] * [DP_4] \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & \times & \times & \times \\ 0 & \times & \times & \times \\ 0 & 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2.4 Projeto acoplado

É do ponto de vista axiomático, o pior tipo projeto possível dado que não só desrespeita o primeiro axioma, mas ao contrário do projeto desacoplável, não é possível proceder a alterações para eliminar quaisquer dependências.

O nível de interdependências entre as funções, requisitos e elementos internos é de tal forma que qualquer alteração num elemento irá despoletar uma série de alterações nos elementos restantes, sendo impossível o ajuste individual.

Em termos matriciais, todas as matrizes que não sejam triangulares ou diagonais correspondem a projetos acoplados [8].

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & \times & 0 & \times \\ 0 & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.5 Axioma da Informação

O Axioma da Informação surge como ferramenta para decidir qual o melhor projeto de entre aqueles que respeitam o Axioma da Independência.

Mesmo que dois projetos distintos apresentem FRs semelhantes ou idênticos, podem diferir nas soluções aos mesmos desafios. Nesta situação torna-se benéfico identificar o melhor projeto entre os dois. Sendo assim é utilizada a função logarítmica de modo a averiguar qual dos projetos apresenta maior probabilidade de satisfazer os objetivos através dos requisitos funcionais, sendo a informação medida em bits [6].

Este axioma pode ser exprimido de forma genérica através da equação 3.12:

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} = -\log_2 P_i \quad (3.12)$$

P_i é definido, como a probabilidade de um genérico, DP_i , satisfazer o seu requisito funcional correspondente, FR_i . Este valor pode ser obtido através das funções probabilidades que melhor descrevem o funcionamento do sistema.

O cálculo do conteúdo de informação para um projeto desacoplado, ou seja, para n requisitos funcionais, é feito através da equação 3.13:

$$I_{sistema} = -\log_2(\prod_{i=1}^n P_i) \quad (3.13)$$

Alternativamente, a probabilidade de sucesso pode ser calculada graficamente ao definir o intervalo de projeto, *design range*, e determinar o intervalo do sistema, *system range*, em que o projeto proposto satisfaz o FR. O intervalo comum entre os dois permite calcular a probabilidade de sucesso. A figura 3.4 apresenta, de forma gráfica, este processo, partindo do pressuposto que o funcionamento do projeto, relacionado com este requisito é descrito por uma função distribuição normal.

Finalmente, é possível averiguar a presença de ambos os intervalos bem a área comum a ambos (A_r) que quando dividida pela área do sistema corresponde à probabilidade de sucesso [8].

Após obter a probabilidade de satisfazer o requisito funcional, é possível utilizar novamente a equação 3.13 e substituir P_i na mesma para obter o conteúdo de informação do sistema, caso este corresponda a um projeto desacoplado[6].

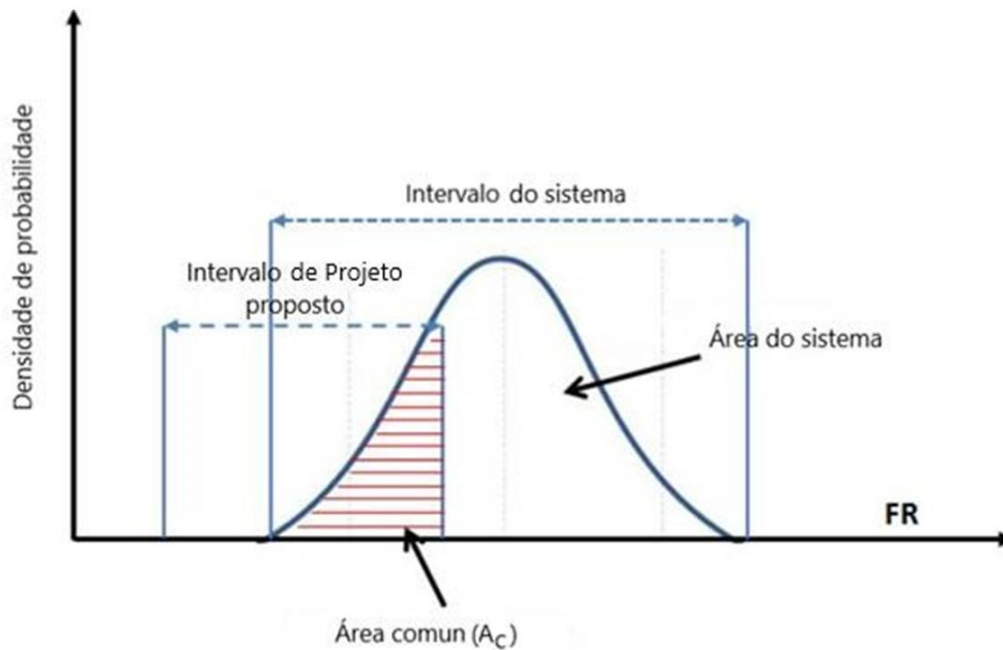


Figura 3.4: Componentes do axioma da informação [7].

Após obter a probabilidade de satisfazer o requisito funcional, é possível utilizar novamente a equação 3.13 e substituir P_i na mesma para obter o conteúdo de informação do sistema, caso este corresponda a um projeto desacoplado[6].

Atendendo às equações 3.12 e 3.13 um projeto diz-se complexo quando o conteúdo de informação necessário para cumprir todos os seus requisitos funcionais é elevado. Isto traduz-se numa dificuldade acrescida de ajustar os FRs devido ao nível de precisão necessário aos DPs, ou seja, o nível de informação relacionado a determinado requisito funcional é elevado devido ao grande número de peças envolvidas.

De uma forma sucinta, a minimização da complexidade de um projeto corresponde à maximização da probabilidade de sucesso na tarefa atribuída ao mesmo.

Desta forma, o segundo axioma da Teoria Axiomática, constitui uma base teórica adicional para a construção de um projeto robusto e eficiente.

3.3 Projeto Robusto vs Projeto Redundante

Quando existem vários requisitos funcionais e constrangimentos a cumprir, a seleção de DPs terá de ser um processo minucioso de modo a respeitar os axiomas,

nomeadamente o Axioma da Independência. Para este efeito, existe um conjunto de teoremas e corolários cujo objetivo é simplificar o processo de otimização de um dado projeto. Um projeto é designado de robusto quando contempla possíveis variações consideráveis nos parâmetros de projeto sem comprometer a capacidade de satisfazer todos os requisitos funcionais em simultâneo [9].

É aconselhado que o projeto inicial seja desacoplado ou desacoplável pois só estes são contemplados pelo Axioma da Informação. Num projeto desacoplado a otimização é simples pois basta alterar os DPs individualmente. Contudo num projeto desacoplável, a atenuação dos FRs e DPs tem que ser feita sequencialmente de modo a minimizar o número de alterações ao projeto inicial e de modo a diminuir o conteúdo de informação, como indica o sétimo corolário (*uncoupled design with less information*) [6].

Tanto o terceiro como o quarto corolário (*integration of physical parts* e *use of standardization*, respetivamente) visam reduzir o conteúdo de informação presente no projeto ao minimizar o número de elementos distintos através da estandardização de peças bem como a fusão de vários módulos num só componente físico, desde a independência das várias funções que este desempenhará se mantenha. À semelhança do quarto corolário, o quinto corolário (*use of symmetry*), defende o uso de peças ou componentes simétricos para o mesmo objetivo [6].

Outra alternativa para reduzir a informação presente num dado sistema consiste na seleção de requisitos de fácil satisfação, isto é, cujo *design range* seja amplo o suficiente para maximizar o número de possíveis parâmetros que os satisfaçam [9][10].

O caso oposto ocorre quando um projeto apresenta um número de DPs superior ao seu número de FRs. Este tipo de projetos designa-se de projeto redundante. Projetos redundantes servem como exemplo da interconectividade entre os dois axiomas pois desrespeitam o Axioma da Independência e segundo o teorema 4, nunca serão considerados os melhores projetos devido ao elevado grau de variação dos parâmetros envolvidos. A variabilidade nos parâmetros de projeto resultam num maior nível de informação.

4 *Design for Maintainability*

Design for Maintainability (DfM) foi instituído oficialmente pelas forças armadas americanas durante a década de sessenta, mais precisamente com a redação do documento denominado de "*Policies Governing Maintenance Engineering within the Department of Defense*" em junho de 1968. Neste documento, o DfM é descrito como a atividade de criação de critérios e requisitos técnicos antes de os aplicar a qualquer projeto durante a sua fase conceptual de modo a permitir a manutenção adequada, célere e economicamente viável do equipamento militar. Pouco tempo depois da sua implementação na esfera militar, foi adotada, de forma gradual, pela indústria [11].

O DfM só poderá ser aplicado a sistemas que podem ser reparados ou que necessitam de manutenção. Sistemas que são descartados após uma falha crítica e sistemas cuja substituição de componentes não é exequível são sistemas que o DfM não contempla [12]. Esta abordagem ao projeto de sistemas mecânicos pode constituir uma ferramenta útil para um engenheiro quando conjugada com a Teoria Axiomática de Projeto.

A incorporação dos vários princípios do *Design for Maintainability* no sistema prescrito pela axiomática de Suh é sentida nas fases iniciais do projeto, isto é, no levantamento das necessidades do cliente e na definição dos primeiros requisitos funcionais sob a forma de constrangimentos ao projeto, mas também como requisitos específicos nos casos em que a manutenção corretiva, ao contrário da manutenção preventiva, é priorizada. Como os constrangimentos definidos na fase inicial do projeto condicionam todas as decisões feitas durante todo o projeto, a inclusão do *Design for Maintainability* afeta todas as etapas do processo axiomático [14][15].

Segundo J. Gullo [11], de modo a conjugar as necessidades funcionais de um sistema com os requisitos da manutenção desse mesmo sistema, é necessário considerar os seguintes princípios:

- Estandarização
- Modularidade
- Desenvolvimento de conjuntos completos
- Intermutabilidade
- Acessibilidade
- Detecção de falhas
- Isolamento de falhas
- Identificação de componentes

Estes, por sua vez, conferem ao sistema e aos seus operadores benefícios indispensáveis nos campos da funcionalidade, do tempo e do custo da manutenção quanto mais complexo for o sistema.

Estandarização

Projetar o sistema de modo a que utilize o maior número possível de peças pré-fabricadas tais como parafusos e rolamentos estandarizados e incorporar o maior número de elementos compatíveis com estes é equiparável a torná-lo mais simples.

Esta simplificação do sistema, apesar de nem sempre ser aplicável, confere, em regra geral duas grandes vantagens ao sistema. Uma destas envolve minimizar o número de peças sobressalentes mantidas em reserva pois a aquisição do tipo de peças mencionado é um processo fácil e célere. Outra vantagem é auxiliar a manutenção, seja esta corretiva ou de rotina. A manutenção torna-se automaticamente mais eficiente ao utilizar peças estandarizadas dado que o transporte destas peças é mais simples e a própria substituição não requer algum tipo de treino especial.

Ambas reduzem o "downtime" do sistema e a uma melhor organização da componente técnica da fábrica [12].

Modularização

A modularização dos elementos de um sistema implica o uso de dimensões, formas e interfaces padrão. Esta limitação intencional não só auxilia a elaboração do projeto, mas também a sua implementação no espaço físico dado as opções disponíveis se encontrem bem documentadas. Caso o desenvolvimento de um outro tipo de produto com outras características seja necessário, então o desenvolvimento de uma nova máquina assentará numa evolução ou apenas numa alteração de alguns aspetos do projeto anterior. O desenvolvimento desta nova máquina é por isso simplificado pois possibilita a substituição de alguns módulos do sistema por outros compatíveis sem que seja preciso alterar o produto na íntegra [11][12].

Desenvolvimento de conjuntos completos

Um conjunto completo, de uma dada máquina, é composto pela máquina, o seu manual de operação, fichas técnicas dos seus componentes individuais e as especificidades da sua montagem e manutenção [11]. As operações de manutenção mais comuns para uma dada máquina também devem ser incluídas bem como os tempos de vida úteis dos seus componentes.

Intermutabilidade

No que toca à ligação entre componentes, é benéfico utilizar peças estandardizadas pois possibilita a aquisição destas mesmas a partir de várias fontes e a substituição dos componentes por outros semelhantes.

Isto resulta, à semelhança da estandardização e da modularização, numa redução significativa do número necessário de peças e elementos da maquinaria em *stock*. Adicionalmente, o desenvolvimento posterior de novos projetos semelhantes ou a alteração de projetos existentes é facilitada dado que as dimensões e a geometria de novos projetos semelhantes serão sensivelmente as mesmas.

Acessibilidade

Durante todas as fases do projeto é necessário considerar o método utilizado na manutenção e as ferramentas envolvidas no processo. Deste ponto de vista torna-se necessário projetar o sistema de modo a disponibilizar o espaço necessário para o operário ou a equipa responsável pela manutenção do sistema e contemplar o manuseamento das ferramentas pelos mesmos em segurança.

Assim o engenheiro auxilia a manutenção do sistema de forma retroativa e como consequência o tempo necessário à reparação diminui. Como consequência, o tempo até a máquina estar completamente operacional também é reduzido.

Deteção e isolamento de falhas

Tanto a deteção como o isolamento de falhas no sistema são consequências diretas dos princípios anteriores, nomeadamente da modularização dos vários componentes do sistema projetado e do desenvolvimento de conjuntos completos.

Em máquinas simples a deteção de falhas pode ser efetuada visualmente, contudo quando é necessário diagnosticar sistemas de máquinas ou máquinas compostas por um número elevado de componentes este método não é exequível. Sendo assim, a própria máquina ou sistema são responsáveis pela deteção de falhas com o intuito de transmitir esta informação ao utilizador de forma autónoma.

Qualquer ação de manutenção, num regime corretivo, sucede o isolamento das falhas detetadas pois ao isolar a falha, é possível evitar que outros elementos ou peças também sofram consequências negativas devido à falha inicial ou pela interrupção do funcionamento do sistema. Tal dano residual deve ser contemplado pelo projeto inicial de modo a assegurar a longevidade do equipamento em uso [11].

Identificação dos componentes

Todos os elementos do projeto devem estar devidamente identificados e de tal forma que esta informação se encontre disposta no mesmo local em todos os elementos. A identificação dos componentes em reserva deve ser concordante com a documentação fornecida pelo fornecedor juntamente com os manuais de funcionamento e as instruções de montagem e de manutenção.

Para auxiliar qualquer operação de manutenção, é uma boa prática desenvolver uma nomenclatura simplificada de modo a evitar erros e diminuir a experiência e a familiaridade necessárias por parte dos responsáveis pela manutenção [12].

4.1 Tipos de manutenção

Uma vez conhecidos os princípios básicos do DfM, é necessário que se conheçam os dois tipos de manutenção praticados atualmente.

Todas as operações de manutenção podem ser inseridas em duas categorias:

- Manutenção programada
- Manutenção corretiva

As duas distinguem-se pelas causas que levam à necessidade de realizar a operação. Dito isto a correção programada normalmente tem como objetivo prevenir o aparecimento de falhas na máquina, adicionar novos elementos que auxiliem o funcionamento da mesma ou adicionem funcionalidades à máquina, remover ou substituir máquinas desatualizadas e em último instante remover e substituir elementos de uma máquina cujo tempo de serviço foi ultrapassado. Já a manutenção corretiva é utilizada como resposta a uma falha crítica inesperada que compromete o funcionamento da máquina [11][12][13].

Ainda é possível decompor a manutenção programada em cinco subtipos distintos:

- Manutenção preventiva
- Manutenção de atualização
- Manutenção aditiva
- Manutenção de substituição

- Manutenção de remoção

O primeiro tipo de manutenção é aquele em que a inspeção da maquinaria é periódica. Esta requer a elaboração de um plano de manutenção que contempla as especificidades de cada máquina, pois o desgaste sofrido pelas mesmas não será uniforme.

A manutenção de atualização distingue-se da manutenção de substituição não só por ter como foco, componentes individuais ou módulos, contidos num conjunto que forma a máquina, mas também porque contempla atualizações e adições de *software*. Esta também recorre ao uso extensivo de LRUs, *line replacement units*.

Já a manutenção aditiva visa a implementação de novas máquinas numa linha de produção existente ou a montagem de dispositivos auxiliares na maquinaria existente, como por exemplo, sondas ou sensores.

O último tipo de manutenção, a manutenção de remoção visa a remoção de elementos obsoletos.

Por fim apresentam-se os vários benefícios da manutenção programada na figura 4.1. Embora estas benesses se apliquem a todos os seus constituintes, são mais evidentes na manutenção preventiva [14][16].

Dentro da manutenção preventiva ainda existe um tipo de regime específico, designado de *Condition Based Maintenance*. Este é um regime que emprega técnicas de diagnóstico de modo a prever a condição física do equipamento e assim estabelecer um plano de manutenção adequado [16].

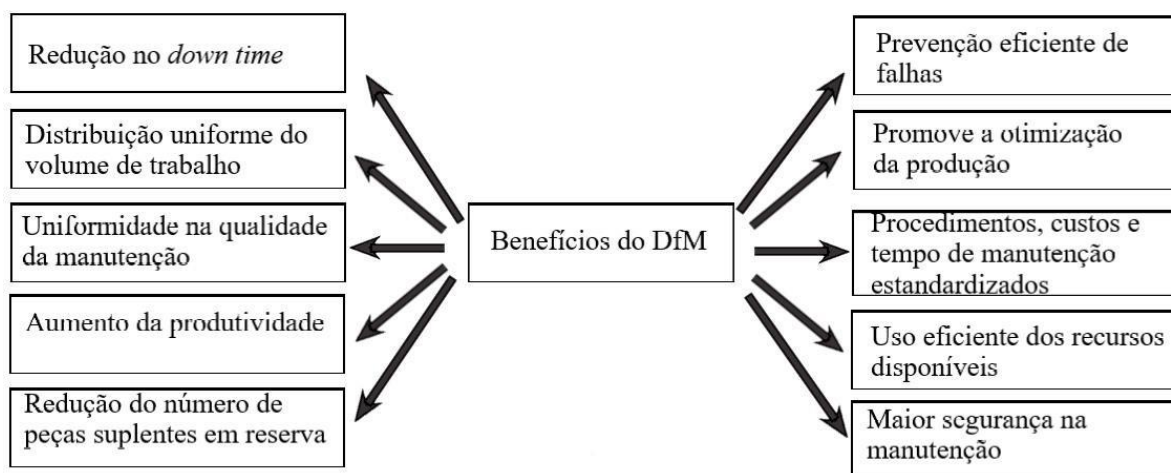


Figura 4.1: Mais valias associadas à manutenção corretiva.

4.2 Teoremas

Uma vez conhecidos os princípios que servem com pilares ao *Design for Maintainability* é possível continuar a análise desta metodologia. Grande parte dos processos de manutenção têm como base a experiência empírica adquirida previamente e documentada. Atendendo a este facto, foram criados teoremas que resumem os padrões documentados que se repetem na indústria [11].

Estes teoremas visam explicar a relação entre os princípios apresentados e as tendências que se observam durante o funcionamento de sistemas reais.

Teorema 1: A Manutenibilidade de um dado sistema é inversamente proporcional à sua Confiabilidade. (*Maintainability of a given system is inversely proportional to its Reliability*).

Define-se como Confiabilidade (*Reliability*), a probabilidade de um sistema funcionar devidamente, sem quaisquer tipo de falha, durante o período de tempo para o qual este foi projetado. Desta forma, quando a confiabilidade de um sistema é 100%, não existe necessidade de efetuar reparações pois o funcionamento do sistema nunca será comprometido [12].

À medida que o número de falhas críticas aumenta, o número de intervenções no sistema aumenta, o tempo em que o sistema está inoperacional aumenta [11].

Como a criação um sistema infalível é improvável, é importante equilibrar os dois conceitos de modo a obter um sistema robusto, isto é, resistente a falhas, porém fácil de manter operacional.

Teorema 2: A Manutenibilidade é diretamente proporcional à Testabilidade e à Previsibilidade de um sistema (*Maintainability is directly proportional to testability and Prognostics of a system*).

Este teorema defende que quanto mais métodos e equipamento de análise da estrutura ou sistema são incorporados no mesmo, mais fáceis serão as ações corretivas ou preventivas de realizar. Sensores dos vários parâmetros de operação em conjunto com uma base de dados permitem ao utilizador detetar e isolar falhas críticas e os indícios de que estas irão ocorrer [11].

Assim, torna-se possível intervir antes de ocorrer uma falha crítica e quando estas ocorrem, a manutenção é célere pois sabe-se exatamente qual o componente ou elemento defeituoso [12].

Teorema 3: Utilizar módulos com o menor número de componentes, preferencialmente com menos de três (*Strive for ambiguity groups no greater than 3*).

O termo *shotgunning* refere-se à prática algo comum, em que, na ausência de um diagnóstico preciso da avaria num dado dispositivo e em casos em que a reparação do equipamento carece de celeridade, é preferível substituir um conjunto de elementos inteiro em vez de substituir cada um dos constituintes do conjunto individualmente [14].

Porém a substituição de um número elevado de componentes, na maior parte, dos casos, não pode ser feita de forma célere e em segurança. Assim é recomendado que se utilizem dispositivos cujo número de componentes por módulo é reduzido. Assim deverão ser substituídos grupos com apenas três componentes ou menos.

Teorema 4: Abandonar a manutenção programada em prole da adoção de um regime de manutenção com base na condição física do equipamento (*Migrate from scheduled maintenance to condition-based maintenance*).

O tipo de manutenção mais comum é a manutenção corretiva, isto é, a manutenção feita como resposta a uma falha crítica que impossibilite o funcionamento do equipamento. O nível de confiabilidade não só varia consoante as condições de serviço, mas também diminui drasticamente no caso em que o equipamento não é inspecionado e trocado com alguma regularidade. Sendo assim é correto afirmar que as avarias críticas são imprevisíveis e como tal a solução mais eficiente para as combater é amenizar as causas destas avarias.

É mais eficiente alterar o regime de manutenção e praticar manutenção periódica, adaptada a cada dispositivo. A manutenção periódica assenta no conhecimento do grau de desgaste sofrido pelo equipamento cuja previsão é determinada pelo fabricante, através de testes, simulações e ensaios, e pelos parâmetros medidos através dos sensores incorporados no sistema [12].

Este regime de manutenção é superior ao regime periódico e ao corretivo pois apresenta um *down time* inferior ao do primeiro e uma diminuição clara no material suplente necessário em relação ao último. Contudo este teorema supõe que os teoremas

que se seguem são respeitados [14].

Teorema 5: Considerar as necessidades do agente de manutenção aquando a conceção do regime de manutenção (*Consider the human as the maintainer*).

Durante todo o processo de desenvolvimento do projeto é imprescindível considerar como é que o agente de manutenção irá interagir com os seus elementos. Por isso, um projeto complexo e cuja manutenção requer um nível de perícia e conhecimento técnico por parte dos responsáveis é indesejado [11].

Para este efeito deverão ter-se em consideração o tamanho, peso e a geometria dos componentes bem como as ferramentas e métodos necessários para cumprir a tarefa e deixar o sistema operacional. Assim, é importante implementar o devido espaço necessário para os responsáveis pela manutenção, as ferramentas necessárias e os componentes a trocar [13].

Outro método útil para aumentar a eficiência da manutenção será dotar as equipas técnicas do conhecimento relativo à manutenção, mas também quanto ao funcionamento do mesmo [12]. Este último ponto é válido não só para sistemas complexos, mas também para sistemas mais simples pois a compreensão do funcionamento do sistema na sua totalidade em vez do funcionamento de apenas um subsistema permite aos responsáveis pela manutenção detetar possíveis problemas noutros subsistemas que se relacionem com aquele em manutenção, mas também realizar as suas tarefas com um nível acrescido de segurança para os mesmos e para o equipamento. Assim, a creditação das equipas de manutenção é, sem dúvida, uma mais valia pois representa uma diminuição do risco pessoal associado à manutenção e um decréscimo do risco de danos causados no sistema provenientes de acidentes aquando a manutenção.

Teorema 6: A Modularidade acelera a manutenção (*Modularity speeds repairs*).

A divisão do sistema em módulos independentes minimiza o número e limita o tempo de manutenção. Uma característica destes módulos é a sua remoção fácil. Esta característica torna-se valiosa nos casos em que a manutenção de um dado dispositivo é frequente pois permite a remoção do módulo danificado. Também permite que o módulo ou elemento, caso necessite de uma alteração simples, possa ser trabalhado no local, agilizando o processo.

Teorema 7: A Manutenibilidade de um sistema prevê a tempo necessário para efetuar as reparações (*Maintainability predicts downtime during repairs*).

O *down time* total não só engloba o tempo necessário para completar as reparações para que o sistema volte a um estado operacional, mas também o tempo até uma falha ser detetada bem como os testes finais a efetuar antes de reativar o sistema. A previsão do *down time* é fundamental para minimizar as perturbações ao funcionamento do sistema e assim evitar comprometer a produtividade do sistema [13].

Teorema 8: Entender os requisitos da manutenção de um sistema (*Understand the maintenance requirements*).

Apesar de grande parte dos sistemas desenvolvidos apresentarem semelhanças entre si, divergem muitas vezes em detalhes devido às especificidades dos produtos desenvolvidos. Estes detalhes terão que ser considerados na montagem do equipamento numa fábrica e a sua posição deve consumir uma porção considerável do processo de desenvolvimento de uma linha de produção. A alternativa é modificar o sistema após a montagem, ao aplicar medidas específicas a cada máquina.

Efetuar modificações nas fases mais avançadas do projeto ou após a conclusão da montagem pode não ser possível. Nos casos em que estas alterações são possíveis, implicam custos consideráveis e aumentam a suscetibilidade do sistema a falhas críticas [11][14].

Este risco acrescido provém da implementação de especificações ambíguas durante a montagem do sistema cujas consequências podem não ser aparentes imediatamente. Por estas razões é prudente considerar a manutenção do equipamento desde o início do projeto.

Teorema 9: Auxiliar a manutenibilidade com dados recolhidos (*Support maintainability with recovered data*).

Para elaborar e assegurar um regime de manutenção eficiente é necessário recorrer a dados e documentação sobre o sistema, isto é, sobre o seu desenvolvimento e sobre o seu funcionamento. No caso desta informação incidir sobre o funcionamento do sistema ou sobre como é que o projeto concebido pode falhar, como por exemplo, através do *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), designa-se de *design data*.

Alternativamente, toda a informação empírica é designada por *maintenance task time data* [11].

A *design data*, por sua vez, não é de fácil obtenção por parte do cliente dado que grande parte dos documentos disponibilizados pelos fabricantes não incluem a informação e dados resultantes de análise do funcionamento do equipamento que fundamentam certas características do projeto.

A *maintenance task time data* é o tipo de informação mais abundante e por isso é utilizada como base para prever o tempo necessário para concluir uma tarefa e a ocorrência destes instantes de manutenção para um dado sistema.

Com base nos parágrafos anteriores, é benéfico que o sistema auxiliar utilizado para recolher e armazenar estes dados seja compatível com os outros sistemas utilizados pelo cliente de modo a maximizar a aplicação destes mesmos dados.

5 Metodologia proposta

Uma vez apresentados dois métodos de análise da linha de secagem, pode-se então proceder à introdução da metodologia sugerida para este projeto.

Com o objetivo de reduzir o número de iterações do projeto até este estar apto para ser implementado, de promover uma montagem célere e assegurar o seu desempenho serão utilizados, em conjunto, a Teoria Axiomática do Projeto e o *Design for Maintainability*. De um modo geral pode dizer-se que a AD proporciona ao engenheiro os requisitos para assegurar o funcionamento do projeto enquanto que o DfM dá a conhecer quais as condições necessárias para assegurar o desempenho do projeto a longo prazo. Estas condições surgem como um conjunto de requisitos adicionais, distintos daqueles que advém da AD. O seguinte diagrama (figura 5.1) ilustra a sequência proposta e as etapas a percorrer na elaboração e implementação, de forma genérica, para um projeto.

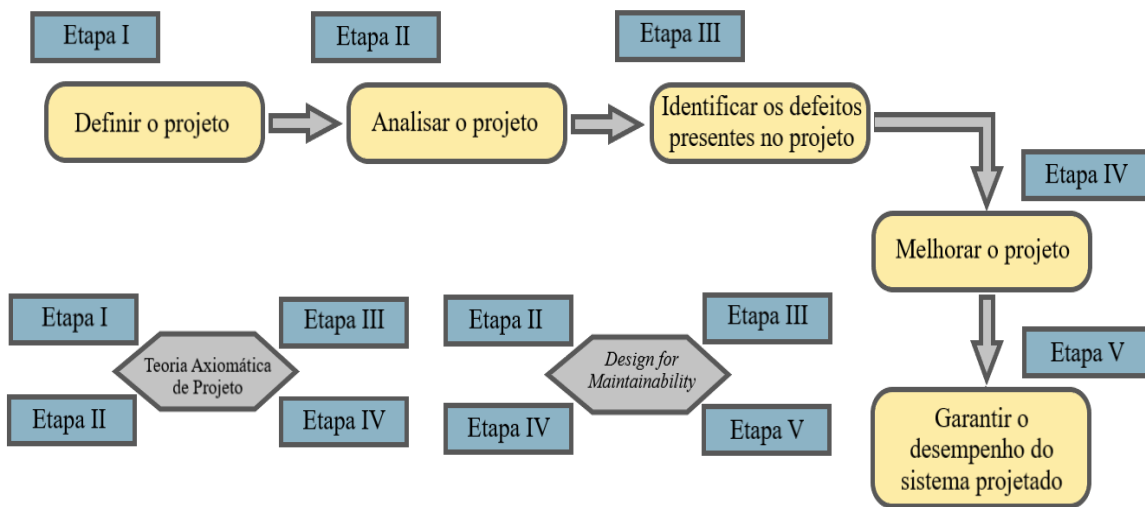


Figura 5.1: Cinco etapas da metodologia proposta.

5.1 Definir o projeto

A primeira etapa consiste primeiramente em definir o domínio do cliente uma vez que o levantamento e a identificação das necessidades do cliente, dos objetivos a alcançar e finalmente, o problema. Só assim é que se torna possível estabelecer os requisitos funcionais de forma correta. Isto é um aspeto fundamental da conceção de um projeto pois no caso em que esta sequência não é respeitada, é possível apresentar soluções para

um dado problema que não o problema apresentado pelo cliente.

A AD será aplicada antes do DfM, na elaboração dos domínios funcional e físico. Deste modo, é possível estabelecer as funções que o sistema projetado terá de cumprir e quais os mecanismos que o compõem, através dos quais as funções são ajustadas.

5.2 Analisar o projeto

A próxima etapa consistirá na análise do projeto segundo a AD de modo a identificar as possíveis dependências presentes nos seu domínios.

De seguida, será utilizado o DfM para analisar os DPs estabelecidos. Embora o objetivo principal do DfM é elaborar um plano de manutenção para o sistema projetado este objetivo não pode ser atingido sem considerar o funcionamento e a montagem das máquinas que o compõem. O conhecimento sobre a montagem e o funcionamento do sistema irá afetar as decisões tomadas na elaboração do plano de manutenção para a linha de secagem. A análise efetuada também terá como objetivo identificar quais dos princípios do DfM, que não foram, até agora, aplicados ao projeto.

Dos DPs que aderem aos princípios apresentados no quarto capítulo derivam características pertinentes ao plano de manutenção. Tais características podem ser separadas em categorias diferentes. Na tabela 2 apresentam-se as categorias consideradas nesta metodologia e os princípios do DfM correspondentes. Estas categorias serão úteis na identificação dos defeitos num projeto uma vez que a aplicação os princípios do *Design for Maintainability* é facilitada através deste método.

Tabela 2: Categorias correspondentes aos problemas que serão detetados através da análise segundo DfM.

Número	Princípio do <i>Design for Maintainability</i>	Categoria
1	Estandarização	Armazenamento
2	Modularidade	Montagem , Manutenção
3	Desenvolvimento/existência de conjuntos completos	Documentação
4	Intermutabilidade	Montagem
5	Acessibilidade	Manutenção
6	Deteção de falhas	Informação
7	Isolamento de falhas	Informação
8	Identificação de componentes/elementos	Informação , Documentação

A criação destas categorias depende dos processos utilizados, do produto final e da maquinaria empregue. Para a secagem de biomassa e mais precisamente para o caso da Regina Cork foram criadas as categorias presentes na tabela 2.

Seguem-se a identificação dos defeitos, e a elaboração de soluções para os defeitos detetados também são auxiliados por esta sistematização

Assim a criação de uma métrica comum para avaliar o funcionamento de todos os dispositivos envolvidos num dado processo é outra ferramenta útil na elaboração de um projeto ou na melhoria do mesmo.

5.3 Identificar os defeitos presentes no projeto

A identificação dos defeitos no projeto que resultam nas dependências e na ineficiência da manutenção do sistema é auxiliada pela análise do projeto segundo as categorias criadas na etapa II.

O processo de identificação de defeitos no sistema projetado é um processo gradual e deve ser feito, sempre que possível, em conjunto com o melhoramento do processo, que corresponde à etapa seguinte. Desta forma são detetados defeitos e em seguida, são criadas soluções para os mesmos. Contudo, em certos casos, como resultado das alterações feitas ao projeto, surgem novos defeitos. Estes, por sua vez, podem não afetar o funcionamento do projeto da mesma forma nem na mesma magnitude que os defeitos anteriores e por esta razão requerem novas soluções. Assim pode estabelecer-se um ciclo entre as etapas III e IV, exemplificado na figura 5.2.

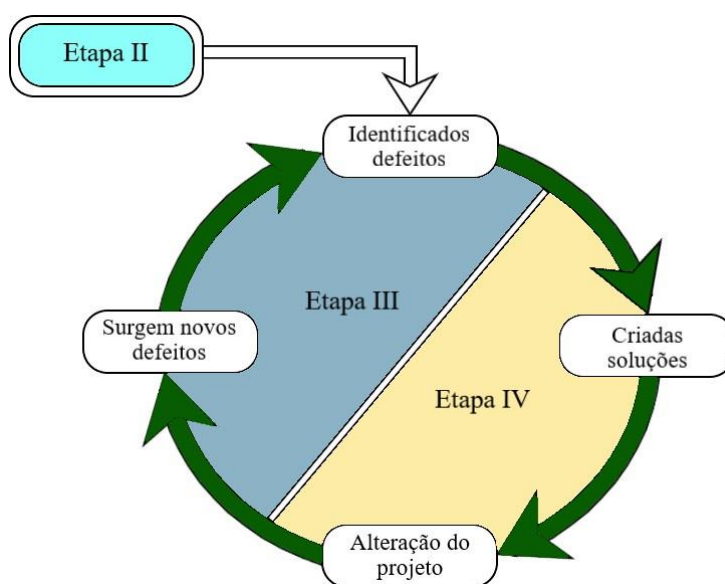


Figura 5.2: Interação entre a terceira e quartas etapas.

Desta forma as duas etapas, “Identificar defeitos” e “Melhorar o projeto” são duas etapas a decorrer em simultâneo e assim uma irá influenciar a outra. Por esta razão, é benéfico procurar conceber um projeto algo robusto desde o início da segunda etapa, “Analisar o projeto”.

5.4 Melhorar o projeto

Este ciclo apresentado na figura 5.2 acaba quando já não se detetam mais defeitos ou quando os defeitos no projeto deixam de prejudicar o funcionamento do sistema. Isto é, segundo a teoria axiomática de projeto, quando o projeto é desacoplado ou desacoplável. Segundo o DfM esta situação corresponde a um projeto cujas necessidades da manutenção não só são compreendidas, mas também são satisfeitas através da implementação de requisitos que traduzam os seus princípios e soluções, tanto na montagem e manutenção do equipamento, que reflitam os seus teoremas.

O resultado é um projeto ou um conjunto de projetos capazes de aderir a todos os princípios do *Design for Maintainability* sem que se alterem os requisitos funcionais e parâmetros do projeto definidos anteriormente através da adesão à AD.

As alterações no projeto levam ao aparecimento de várias versões do mesmo. Estas variações, como ilustra a figura 5.3, incidem sobre vários campos da produção. Por exemplo, no que se refere aos colaboradores, se possuem as competências necessárias ou se é possível prover formação.

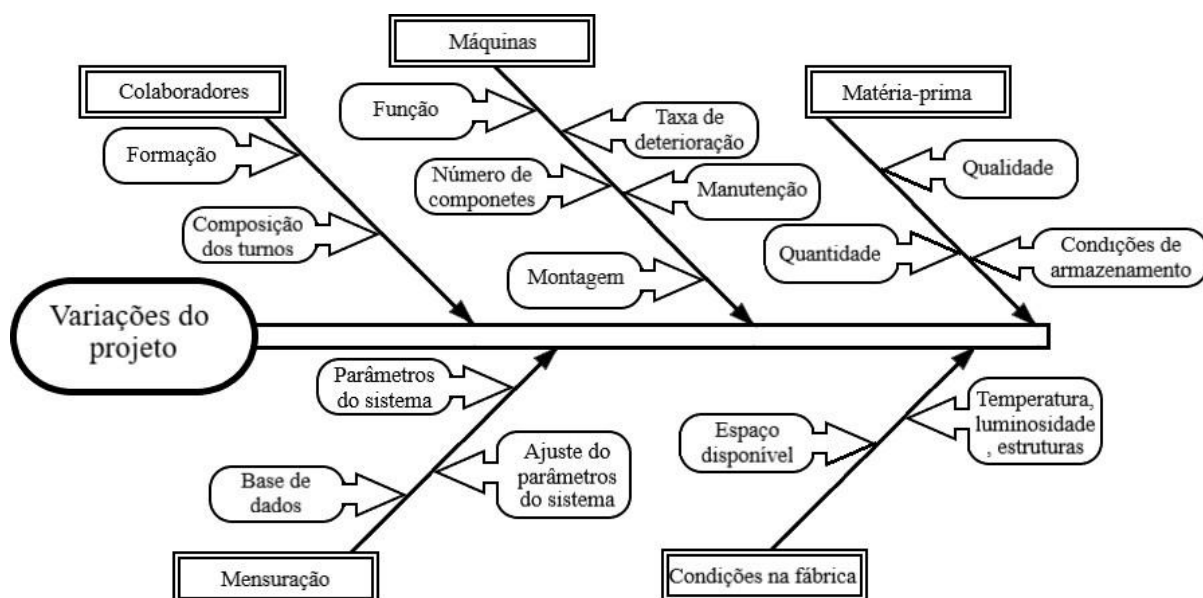


Figura 5.3: Aspectos do sistema responsáveis pelas variações do projeto.

Uma vez criadas as soluções para os defeitos detetados e as versões distintas do projeto procede-se à escolha da versão a desenvolver e implementar. Para este efeito, é novamente empregue a AD, mais precisamente o Axioma da Informação.

5.5 Garantir o controlo do sistema projetado

Na etapa final da metodologia apresentada procura-se garantir o desempenho do sistema projetado. Portanto existe a necessidade de solucionar os problemas detetados e proporcionar ao sistema meios para monitorizar os parâmetros da produção. Através destes meios é possível avaliar a integridade dos dispositivos utilizados.

As etapas anteriores são cruciais para o planeamento e a implementação de mecanismos que permitam o controlo do funcionamento do sistema. Isto, pois, a última etapa desta metodologia incide sobre certos teoremas do DfM, nomeadamente o quarto, sétimo, oitavo e nono teoremas (figura 5.4).

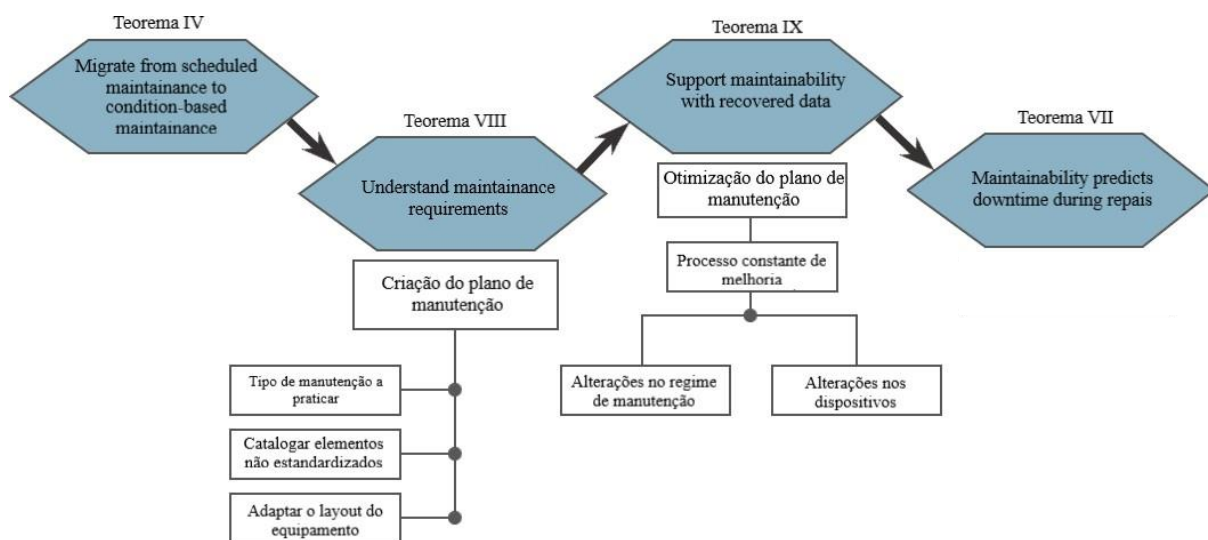


Figura 5.4: Teoremas utilizados na melhoria do plano de manutenção.

Desta forma o plano de manutenção não é um mecanismo estático, mas sim um mecanismo que sofre iterações ao longo do tempo, da mesma forma que o sistema projetado é alterado. Assim, a melhoria contínua da manutenção depende diretamente da informação recolhida sobre a operação do sistema.

6 Análise da linha de secagem segundo a Teoria Axiomática de Projeto

Como foi discutido anteriormente e tal como indica a figura 6.1, o pré-processamento da matéria é apenas uma das fases da produção de *pellets* e será o objeto de estudo neste capítulo. A preparação dos resíduos florestais é uma operação composta por três fases distintas: a purga de materiais nocivos à produção, a modificação das dimensões da matéria-prima recolhida e a redução dos níveis de humidade da mesma. As duas primeiras fases envolvem o crivo, as placas magnéticas instaladas ao longo da linha e os moinhos enquanto que a última fase decorre exclusivamente nos secadores que, por sua vez, são alimentados com ar quente, gerado nas fornalhas e biomassa.

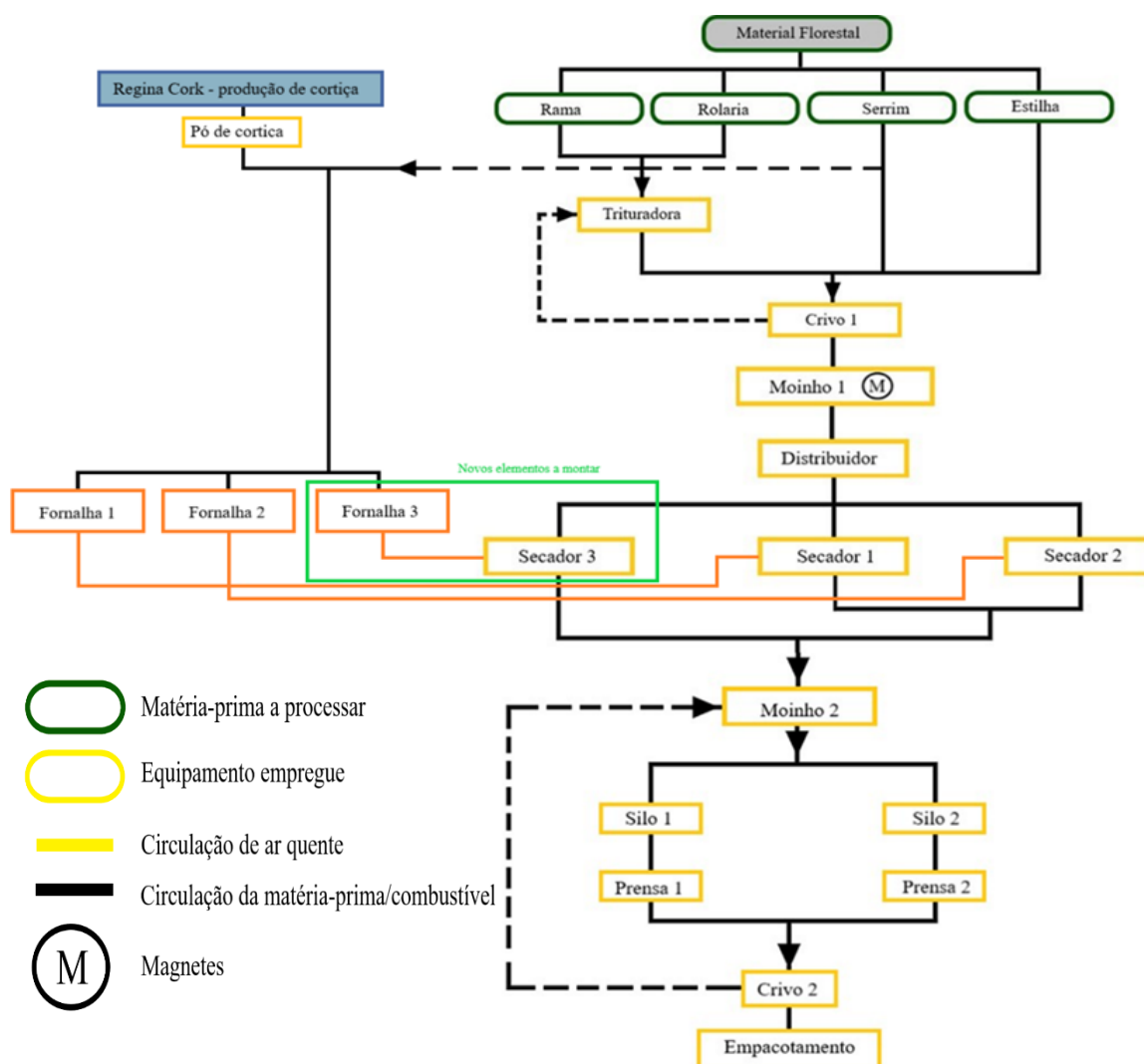


Figura 6.1: Diagrama do equipamento responsável pelo processamento da matéria-prima.

O domínio do processo não será abordado dado o leque de opções disponível para satisfazer cada um dos parâmetros de projeto apresentados.

Adicionalmente, alguns dos elementos dos domínios funcional e físico serão decompostos em outros requisitos e parâmetros cada vez mais específicos à medida que serão adicionados mais níveis ao diagrama de árvore, até o nível de detalhe pretendido, à semelhança do diagrama da figura 6.2.

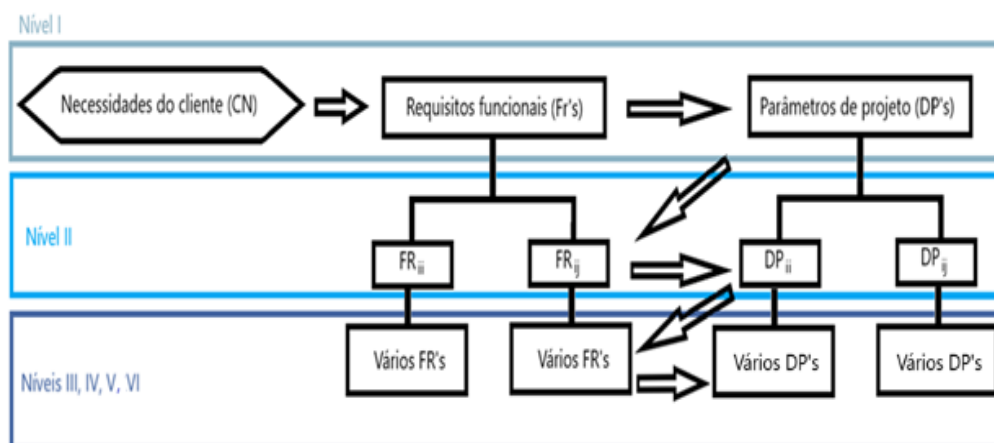


Figura 6.2: Diagrama de árvore generalizado.

6.1 Nível I

De modo a entender o processo de produção de *pellets* será necessário perceber as operações envolvidas na obtenção da matéria-prima processada. Por consequente é vantajoso começar a análise de uma forma geral antes de proceder a uma análise pormenorizada.

Antes de iniciar a análise do domínio físico é necessário definir as necessidades do cliente. De uma forma simplificada, a fábrica procura aumentar a sua produtividade, mais precisamente, durante o Outono e Inverno:

CN - Aumentar a produtividade da fábrica

A produtividade resulta da capacidade em produzir *pellets* e esta, é por sua vez, condicionada pela quantidade de matéria-prima que pode ser processada. Desta forma, a

produtividade é limitada durante o Outono e Inverno devido à humidade acrescida presente na biomassa.

Para combater este acréscimo de humidade é necessário aumentar o tempo de secagem da matéria-prima. Sendo assim o primeiro requisito funcional será:

***FR₁* - Aumentar a capacidade de secagem de matéria-prima**

A empresa optou pela criação de uma terceira linha de secagem:

***DP₁* - Nova linha de secagem**

6.2 Nível II

A análise segundo a Teoria Axiomática de Projeto permite entender a importância de cada um dos subprocessos e os mecanismos que os viabilizam, assim como a sequência utilizada.

Como as *pellets* são obtidas através da aglomeração de resíduos florestais é necessário preparar a matéria-prima quanto à sua dimensão e teor de humidade para que a peletização ocorra sem problemas. Sendo assim, é possível definir o primeiro requisito funcional deste nível:

Esta preparação inicial está dependente das condições da matéria-prima recolhida. Se esta está em conformidade com os parâmetros definidos na norma EnPlus e se não possui nenhuma infestação ou fungos. As especificações apresentadas pela norma EnPlus, em relação à matéria-prima recolhida estão definidas na tabela 3.

***FR_{1.1}* - Preparar a matéria-prima**

Dado que a preparação da matéria-prima é um processo com várias etapas de diferentes níveis e complexidade, não serão definidos mecanismos individuais como DPs, mas sim sistemas compostos por vários mecanismos.

DP_{1.1} - Sistema de preparação

Tabela 3: Tipos de matéria-prima aceite para a produção de pellets segundo a norma europeia [5].

ENplus® A1	ENplus® A2	ENplus® B
1.1.3 Madeira de tronco ^{a)}	1.1.1 Árvore inteira sem raízes ^{a)}	1.1 Madeira virgem da floresta, plantações e outros ^{a)}
1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira ^{b)}	1.1.3 Madeira de tronco ^{a)}	1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira ^{b)}
	1.1.4 Resíduos de exploração florestal ^{a)}	
	1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira ^{b)}	1.3.1 Madeira usada não tratada quimicamente ^{c)}

a) Madeira que tenha sido tratada externamente com conservantes contra ataques de insetos (ex.: lineatus), não é considerada como madeira tratada quimicamente, se os parâmetros químicos dos pellets cumprirem os limites e/ou as concentrações sejam demasiado pequenas para representarem preocupação

b) Níveis negligenciáveis de cola, gordura ou outro tipo de aditivos usados na transformação da madeira em serrações ou na produção de madeira através de madeira virgem são aceitáveis, se os parâmetros químicos dos pellets cumprirem os limites e/ou as concentrações sejam demasiado pequenas para representarem preocupação

c) Madeira de demolição está excluída. Madeira de demolição é proveniente da demolição de edifícios ou de instalações de engenharia civil.

Como os vários processos da preparação da matéria-prima são efetuados em etapas e locais diferentes da pré-produção, torna-se necessário desenvolver um mecanismo capaz de transportar todas as formas de matéria-prima de forma eficaz.

FR_{1.2} - Transportar a matéria-prima

A implementação dos vários mecanismos de transporte de matéria-prima e combustível na fábrica constituem um sistema de transporte:

DP_{1.2} - Sistema de transporte

As temperaturas elevadas dentro do secador bem como no resto da linha de secagem quando combinadas com as dimensões reduzidas de alguns elementos da matéria-prima e níveis de humidade muito baixos, resultam num risco acrescido de combustão por parte

dos elementos mencionados. Estes incêndios não só inviabilizam o uso da matéria-prima afetada, mas também são capazes de comprometer o funcionamento da maquinaria utilizada. Do esforço de minimizar os efeitos nefastos de incêndios, resultam o seguinte requisito funcional:

FR_{1.3} - Detetar e extinguir incêndios

Devido ao risco acrescido de incêndios na linha de secagem e a sua causa, a combustão da matéria-prima, surge a necessidade de criar um conjunto de mecanismos, dispostos ao longo da linha de secagem cujo objetivo é detetar estes incêndios.

DP_{1.3} - Sistema de deteção e extinção de incêndios

Este nível apresenta um número total de três FRs e três DPs. As posições destes no diagrama de árvore da figura 6.3 apresentam-nos como decomposições do FR e DP do nível anterior.

Dado que cada um destes sistemas regula atividades distintas é possível afirmar que o projeto concebido para a linha de secagem é, neste nível, um projeto desacoplado pois respeita o Axioma da Independência.,

A independência entre FRs e DPs traduz-se numa matriz quadrada, 3x3, diagonal, representado pela equação 6.1.

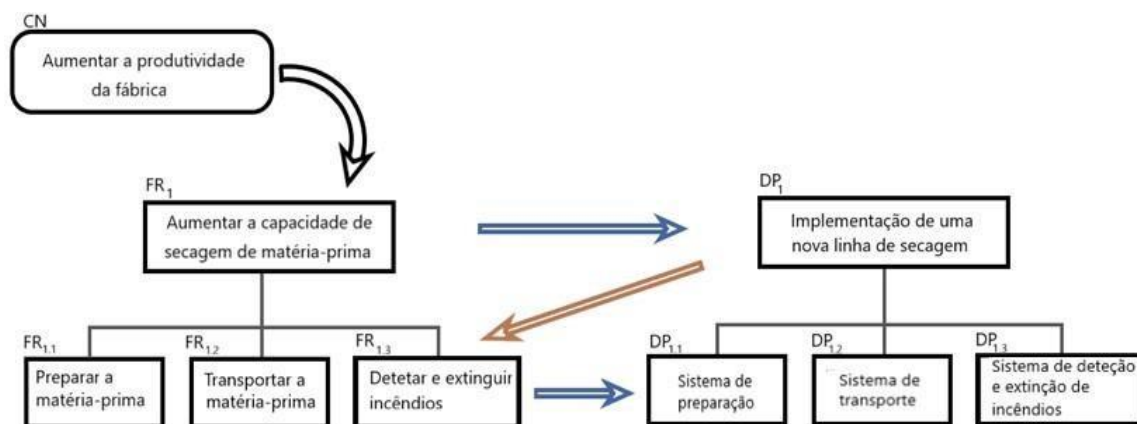


Figura 6.3: Decomposição dos três primeiros níveis do projeto

A equação característica deste nível, quando transcrita na forma matricial origina uma matriz quadrada 3x3 (equação 6.1).

Uma vez que esta corresponde ao subconjunto de FRs e DPs de segundo nível, a ausência de dependências entre FRs é espetável. O resultado é um projeto desacoplado.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1} \\ FR_{1.2} \\ FR_{1.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1} \\ DP_{1.2} \\ DP_{1.3} \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

6.3 Nível III

O contacto com o fluxo de ar quente é um bom método para efetuar a secagem da matéria-prima, porém sabe-se que a taxa de secagem é proporcional à dimensão dos elementos a secar. Isto deve-se ao facto de que o tamanho reduzido dos mesmos aumenta a superfície de contacto da mistura, amplificando o efeito do fluxo de ar quente paralelo dentro do secador.

Esta alteração da matéria-prima é conseguida gradualmente, ao longo do processo de secagem, em três etapas distintas, como exemplifica a figura 6.4.

Desta forma torna-se imperativo incluir a separação dos elementos húmidos com tamanho inferior a 15 mm como requisito funcional:

FR_{1.1.1} - Separar elementos húmidos com dimensão inferior a 15 mm

Através de um movimento vibratório de um crivo e pela ação da gravidade, a biomassa é obrigada a atravessar um conjunto de chapas planas perfuradas (o diâmetro dos furos presentes nas chapas diminui à medida que se estas se aproximam da base). Estas, por sua vez, encontram-se sobrepostas (para que a gravidade auxilie a separação das partículas) e devido ao diâmetro reduzido dos furos, dá-se a separação dimensional da biomassa:

DP_{1.1.1} – Crivo

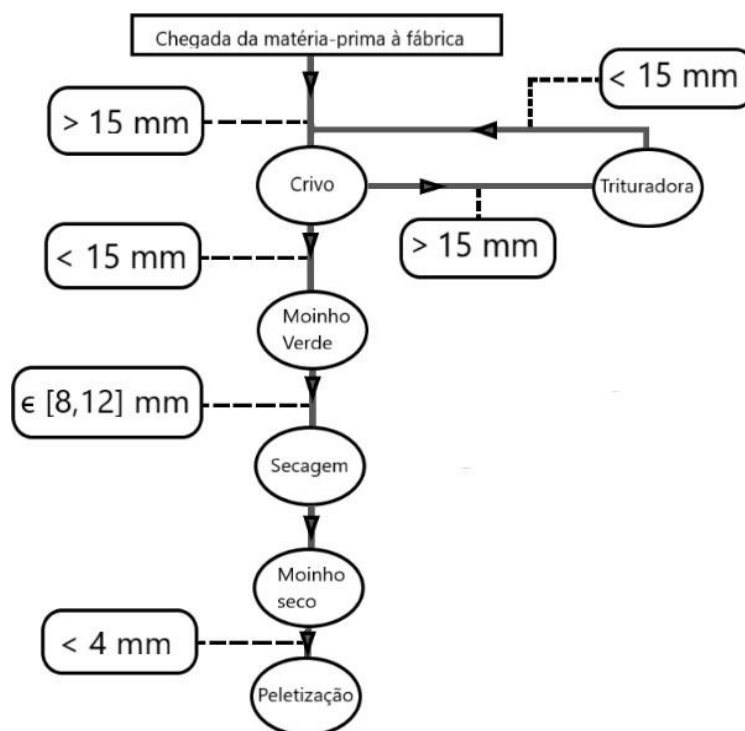


Figura 6.4: Fluxograma da progressão dimensional da biomassa.

Os elementos não conformes permanecem nas chapas do crivo e devem ser submetidos a uma operação que permita reduzir a sua dimensão:

FR_{1.1.2} - Reduzir a dimensão dos elementos húmidos para valores < 15 mm

Em seguida os elementos não conformes são direcionados para uma trituradora. Esta trituradora também é responsável pela redução drástica dos elementos da rama e da rolaria, conforme a figura 6.1.

DP_{1.1.2} - Trituradora

Já os elementos de rolaria, à semelhança da biomassa com dimensões superiores a 15 mm, tem que ser redimensionada para possibilitar o seu processamento:

FR_{1.1.3} - Redimensionar a rolaria

Estes elementos são submetidos à ação de uma prensa e calha. Esta ação é repetida até poderem ser triturados. Uma vez triturados, juntam-se à estilha.

A trituradora difere dos moinhos utilizados pois ao contrário destes destina-se à trituração de elementos com dimensões consideráveis (superiores a um metro).

***DP*_{1.1.3} – Prensa hidráulica**

Após a separação dos elementos da biomassa com dimensões inferiores a 15 mm, estes são alimentados ao moinho “verde”. Este moinho de martelos, por sua vez dispensa fragmentos entre 8 e os 12 mm.

***FR*_{1.1.4} - Reduzir as dimensões do material húmido para valores entre 8 e 12 mm**

O moinho, denominado de moinho "verde" por ser alimentado apenas com biomassa húmida, é responsável por reduzir as dimensões da biomassa que fica retida no crivo:

***DP*_{1.1.4} - Moinho de martelos 1 ("verde")**

Por um lado, o pré-processamento da biomassa procura também eliminar parte da humidade intrínseca da mesma. A humidade intrínseca é um valor fixo, contudo a extrínseca pode apresentar valores diversos. Esta depende do local de recolha e das condições atmosféricas durante o seu período de repouso na fábrica. Para assegurar o nível de qualidade e de densidade dos *pellets*, é necessário reduzir os valores de humidade intrínseca e eliminar por completo a humidade extrínseca:

***FR*_{1.1.5} - Reduzir o valor de humidade da matéria-prima para valores entre os 10% e 12%**

A biomassa após ser recolhida é submetida a um período de repouso antes de ser processada. Durante este período é exetável que esta perca parte da sua humidade relativa durante os meses mais quentes. Porém, esta redução não é suficiente para

viabilizar a produção de *pellets* e, por isso carece de um dispositivo que permita uma secagem homogénea e extensiva, isto é, um secador:

***DP*_{1.1.5} - Secador de tambor rotativo**

O bom funcionamento das prensas também depende do tamanho das partículas utilizadas. De modo a evitar a obstrução dos canais das prensas recomenda-se a alimentação das mesmas com uma mistura de partículas cujo tamanho limite é de 4 mm:

***FR*_{1.1.6} - Reduzir as dimensões do material seco para valores < 4 mm**

Esta última operação de redimensionamento é conseguida através de um último moinho. À semelhança da nomenclatura usada para diferenciar o primeiro moinho, a designação de “seco” deve-se ao facto de este triturar a matéria-prima que sai do secador:

***DP*_{1.1.6} - Moinho de martelos 2 ("seco")**

Por fim, no que toca à preparação da matéria-prima, a ação do moinho de martelos não só resulta na redução do tamanho da biomassa, mas também produz uma quantidade considerável de partículas muito finas. Estas são compostas por matéria florestal e por quaisquer poeiras ou areias que não tenham sido eliminadas pelo crivo. Assim é prudente evitar a poluição do ar na fábrica e evitar a acumulação destas partículas em locais indesejados:

***FR*_{1.1.7} - Eliminar contaminantes resultantes da moagem "verde"**

Por ação de um compressor, o ar expelido pelo moinho é conduzido até um filtro de mangas. Os objetivos deste filtro são captar as partículas mencionadas e permitir a sua recolha, figura 6.5.

***DP*_{1.1.7} - Filtro de mangas**

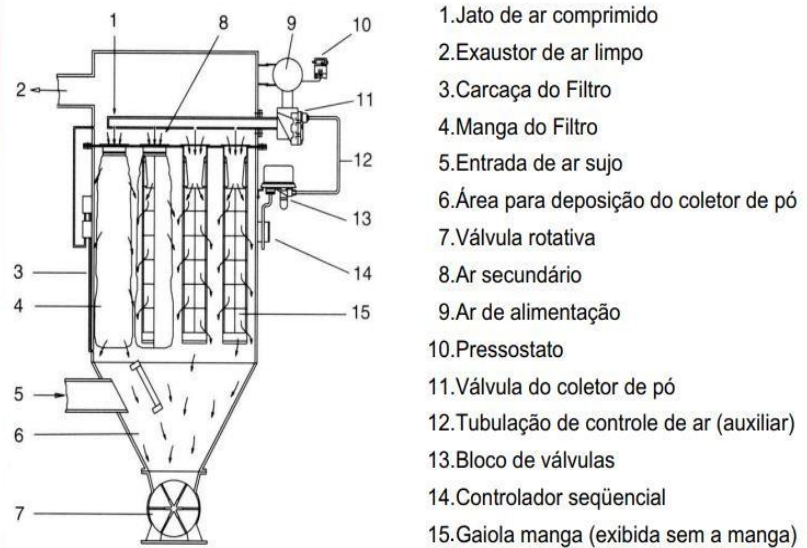


Figura 6.5: Filtro de mangas utilizado na fábrica (esquerda) e componentes individuais do mesmo (direita), adaptado de [17].

Ao compor uma matriz utilizando os requisitos e parâmetros apresentados (equação 6.2) é possível visualizar as dependências presentes neste subconjunto.

Dado que esta é uma matriz quadrada cujas entradas são nulas com a exceção da diagonal principal, então é possível designar este subconjunto como desacoplado.

$$\begin{pmatrix} FR_{1.1.1} \\ FR_{1.1.2} \\ FR_{1.1.3} \\ FR_{1.1.4} \\ FR_{1.1.5} \\ FR_{1.1.6} \\ FR_{1.1.7} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{1.1.1} \\ DP_{1.1.2} \\ DP_{1.1.3} \\ DP_{1.1.4} \\ DP_{1.1.5} \\ DP_{1.1.6} \\ DP_{1.1.7} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Como a figura 6.6 indica, são utilizados vários dispositivos, contudo a sua geometria condiciona sua disposição na fábrica e obriga a matéria-prima a ser transportada entre estes.

Para o primeiro módulo de produção, denominado de módulo de entrada, assinalado na figura 6.6, é necessário mover a matéria-prima até o crivo:

FR1.2.1 - Transportar a matéria-prima desde o silo de entrada até o crivo

Como os vários tipos de biomassa estão contidos em silos separados (silos de entrada), a instalação de um transportador de parafuso sem-fim coberto na base de cada um permite a alimentação do silo de entrada até ao crivo sem perda significativa de material.

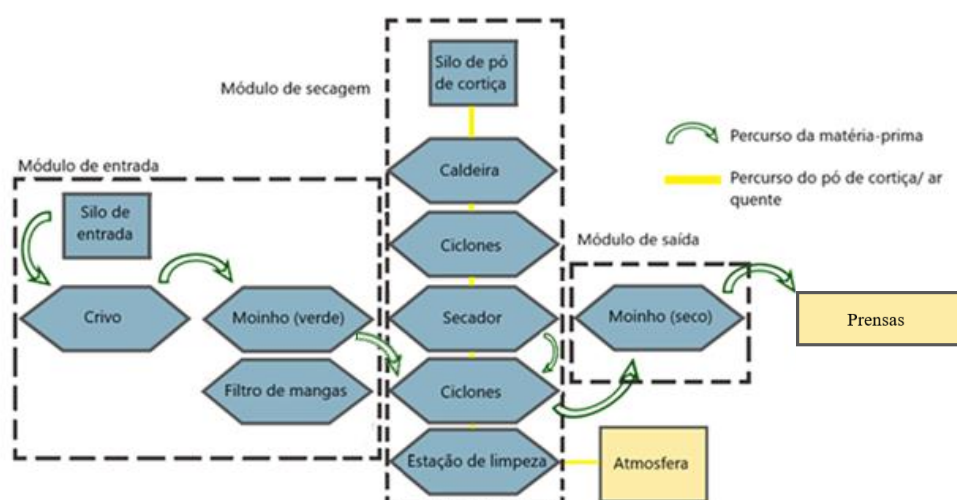


Figura 6.6: Percursos da biomassa e do combustível na linha de secagem

DP1.2.1 – Transportador de parafuso sem-fim 1

Uma vez separada a biomassa em silos diferentes, é necessário transportá-la até o moinho presente neste módulo:

FR1.2.2 - Mover a matéria-prima desde o crivo até o moinho 1 (moinho “verde”)

Enquanto o crivo é responsável pela separação dos fragmentos, um transportador de correia redireciona a biomassa com menos de 15 mm até o silo que alimenta o moinho 1 (moinho “verde”):

***DP*_{1.2.2} - Transportador de correia 1 (tapete rolante)**

Concluídas as ações do módulo de entrada, a matéria-prima está pronta para ser seca, contudo necessita de ser transportada até o módulo seguinte:

***FR*_{1.2.3} - Transportar a matéria-prima desde o moinho de elementos húmidos até o módulo de secagem**

Este silo, por sua vez, não possui nenhuma ligação ao secador e por esta razão a alimentação do mesmo é feita por um colaborador, recorrendo ao uso de uma máquina escavadora (figura 6.7):

***DP*_{1.2.3} - Máquina escavadora**



Figura 6.7: Máquina escavadora utilizada no transporte da biomassa.

Neste módulo tanto a matéria-prima como o ar quente vindo da fornalha carecem de um tipo de transporte distinto daquele utilizado no módulo anterior (sem-fim):

FR_{1.2.4} - Mover a matéria-prima e o ar quente no módulo de secagem

Assim é utilizado um transportador pneumático :

DP_{1.2.4} - Transportador pneumático

Após a secagem, dá-se a separação da biomassa seca do ar utilizado no secador. Enquanto que o ar atravessa os ciclones, a matéria-prima segue em direção ao último moinho:

FR_{1.2.5} - Transportar a matéria-prima através do módulo de saída

Novamente, para minimizar a perda de matéria-prima seca, esta é transportada desde a base dos ciclones até o moinho através de um sem-fim coberto:

DP_{1.2.5} – Transportador de parafuso sem-fim 2

Cada um destes requisitos reflete o equipamento utilizado transporte da biomassa nos três módulos.

O resultado é uma matriz quadrada em que cada FR é realizado através de um e apenas um DP, equação 6.3.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.2.1} \\ FR_{1.2.2} \\ FR_{1.2.3} \\ FR_{1.2.4} \\ FR_{1.2.5} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.2.1} \\ DP_{1.2.2} \\ DP_{1.2.3} \\ DP_{1.2.4} \\ DP_{1.2.5} \end{Bmatrix} \quad (6.3)$$

As condições dentro do módulo de secagem e as condições climatéricas durante o Verão promovem a combustão da biomassa seca dado que esta ainda apresenta temperaturas muito elevadas à saída do secador. Durante o Inverno os valores apresentados pelas fornalhas e pelos secadores são, em geral, menores. Contudo, o risco de incêndio não é nulo.

Embora estes incêndios sejam de pequenas dimensões, o seu aparecimento resulta numa perda de matéria-prima para além de poder danificar os dispositivos utilizados. Daí ser de especial interesse monitorizar a temperatura ao longo do módulo de secagem:

FR1.3.1 - Detetar temperaturas >700 °C na fornalha

O valor de 700 °C é de interesse especial pois é a partir de esta temperatura que se observa a combustão da biomassa. Na tabela 4 encontram-se os valores médios, para o mês de janeiro, dos parâmetros da produção monitorizados na fábrica.

Nesta tabela é também possível observar vários instantes em que a temperatura de saída da fornalha excede o limite estipulado. Quando isto acontece, o sistema informático utilizado para monitorizar a linha de secagem emite um aviso. O técnico presente na sala de controlo, por sua vez, ajusta a velocidade de alimentação da fornalha em questão ou aumenta a velocidade do compressor de modo a diminuir a temperatura na fornalha.

Como o ar quente é gerado na fornalha, faz sentido que esta possua um sensor:

DP1.3.1 - Sensor de temperatura 1

O material em combustão representa um risco de segurança para os operadores e para as estruturas circundantes, mas também para a biomassa que não se encontra danificada. A biomassa em combustão ao entrar em contacto com o resto da biomassa promove a combustão da mesma, inviabilizando-a para a produção de *pellets*. Sendo assim, a sua remoção da linha, é de interesse especial:

FR1.3.2 - Isolar e remover a matéria-prima queimada

Tabela 4: Registo de valores médios, dos parâmetros da produção, para o mês de janeiro de 2024.

Hora	Secador	Fornalha		Secador						Humidade - SILOS			
		Temp. Queima (°C)	Temp. Saída (°C)	Veloc. Ventilad. (%)	Veloc. Tambor (%)	Temp. Entrada (°C)	Temp. Saída (°C)	Temp. Ventilad. (°C)	Alim. Mat. (%)	Silo 1 (%)	Silo 1.2 (%)	Silo 2 (%)	Silo 2.2 (%)
07:00	Secagem 1	452	687	77	50	529	135	74	31	45,36		14,45	
07:30	Secador 2	679	800	95	54	531	107	100	36		42,36		14,27
08:00	Secagem 1	415	651	77	50	525	122	72	32			18,36	
08:30	Secador 2	679	506	95	54	535	109	97	35				12,72
09:00	Secagem 1	348	365	77	50	546	100	70	29			18,12	
09:30	Secador 2	521	500	95	54	552	109	77	29				12,67
10:00	Secagem 1	350	638	77	50	528	114	72	29			17,63	
10:30	Secador 2	695	786	95	54	523	110	90	33				12,51
11:00	Secagem 1	514	697	77	50	550	118	73	29	44,78		17,21	
11:30	Secador 2	663	784	95	54	537	104	89	33		43,55		10,29
12:00	Secagem 1	372	715	77	50	556	101	75	29			19,6	
12:30	Secador 2	667	795	95	54	542	100	87	34				13,89
13:00	Secagem 1	388	643	77	50	539	99	72	28			17,94	
13:30	Secador 2	653	773	95	54	539	100	85	32				12,11
14:00	Secagem 1	409	724	77	50	554	86	73	28			16,29	
14:30	Secador 2	668	801	95	54	532	88	75	35				10,35
15:00	Secagem 1	628	481	77	50	531	72	72	31	48,26		18,24	
15:30	Secador 2	634	796	77	50	531	98	72	32		44,49		11,43
16:00	Secagem 1	650	633	92	54	536	84	75	38			16,45	
16:30	Secador 2	412	800	77	50	536	98	74	32				11,97
17:00	Secagem 1	436	625	92	54	530	87	80	36			15,97	
17:30	Secador 2	508	793	77	50	530	95	74	32				12,8
18:00	Secagem 1	534	583	93	54	526	84	76	39			20,38	
18:30	Secador 2	488	757	77	50	547	93	75	32				10,97
19:00	Secagem 1	425	525	95	54	510	107	90	35	44,32		14,96	
19:30	Secador 2	523	782	77	50	545	101	75	32		40,98		15,16
20:00	Secagem 1	581	664	95	54	529	111	95	36			12,41	
20:30	Secador 2	624	789	77	50	544	95	74	32				11,17
21:00	Secagem 1	498	624	95	54	523	111	93	35			18,63	
21:30	Secador 2	503	787	77	50	539	111	74	32				13,79
22:00	Secagem 1	471	666	95	54	531	110	100	37			17,36	
22:30	Secador 2	376	749	77	50	538	100	74	32				14,74
23:00	Secagem 1	628	481	77	50	531	72	72	31	45,91		18,24	
23:30	Secador 2	400	787	80	54	468	102	97	45		43,21		10,78
00:00	Secagem 1	388	669	77	50	532	123	73	30			15,9	
00:30	Secador 2	469	734	77	50	477	113	84	38				16,34
01:00	Secagem 1	444	687	77	50	534	109	73	30			20,36	
01:30	Secador 2	655	804	77	50	523	112	88	40				17,35
02:00	Secagem 1	330	667	77	50	550	115	74	30			20,06	
02:30	Secador 2	648	757	77	50	511	109	90	40				18,28
03:00	Secagem 1	653	339	77	50	533	123	73	30	43,99		19,72	
03:30	Secador 2	650	754	77	49	504	114	49	38		44,97		14,05
04:00	Secagem 1	376	565	77	50	477	120	68	31			24,04	
04:30	Secador 2	619	699	77	49	470	120	98	42				13,17
05:00	Secagem 1	601	685	77	48	530	113	73	28			20,92	
05:30	Secador 2	536	796	83	52	519	101	86	40				13,95
06:00	Secagem 1	416	700	77	50	550	150	73	28			19,73	
06:30	Secador 2	678	799	77	49	537	119	100	39				13,3

A remoção do material é feita com recurso a um sistema que abre a tubagem utilizada para transportar o material e que posteriormente o retira do módulo de secagem, impedindo que a matéria-prima não afetada entre na zona em chamas.

***DP*_{1.3.2} - Sistema de desvio**

Após ser detetado um aumento significativo da temperatura no módulo de secagem e após ter-se confirmado a existência bem como a localização de um incêndio procede-se também à extinção do mesmo.

***FR*_{1.3.3} - Extinguir chamas**

Para este efeito, é acionado, consoante a localização do incêndio, um conjunto de aspersores de água, dispostos estrategicamente ao longo da linha de secagem. Estes, por sua vez, controlam e extinguem as chamas.

***DP*_{1.3.3} - Aspersores**

A associação entre estes FRs e DPs, traduzida na equação, revela que um dos FRs depende da ação de mais do que um DPs. Embora a extinção das chamas resulte diretamente da ação de aspersores, esta também é conseguida pela ação do sistema de desvio. Este sistema de desvio, que será decomposto no nível seguinte, não só corta o fluxo de biomassa, mas também de ar à zona de incêndio, impedindo a alimentação das chamas.

Como o ajuste do ***FR*_{1.3.3}** é conseguido através do ***DP*_{1.3.2}** e do ***DP*_{1.3.3}** a equação característica para estes elementos corresponderá a um projeto desacoplado (equação 6.4). Assim para garantir a independência entre FR's, é necessário garantir que o ***FR*_{1.3.2}** é sempre atuado antes do ***FR*_{1.3.3}**.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.3.1} \\ FR_{1.3.2} \\ FR_{1.3.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ 0 & x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.3.1} \\ DP_{1.3.2} \\ DP_{1.3.3} \end{Bmatrix} \quad (6.4)$$

Na figura 6.8, estão expostos os diagramas de árvore, até o terceiro nível, do projeto.

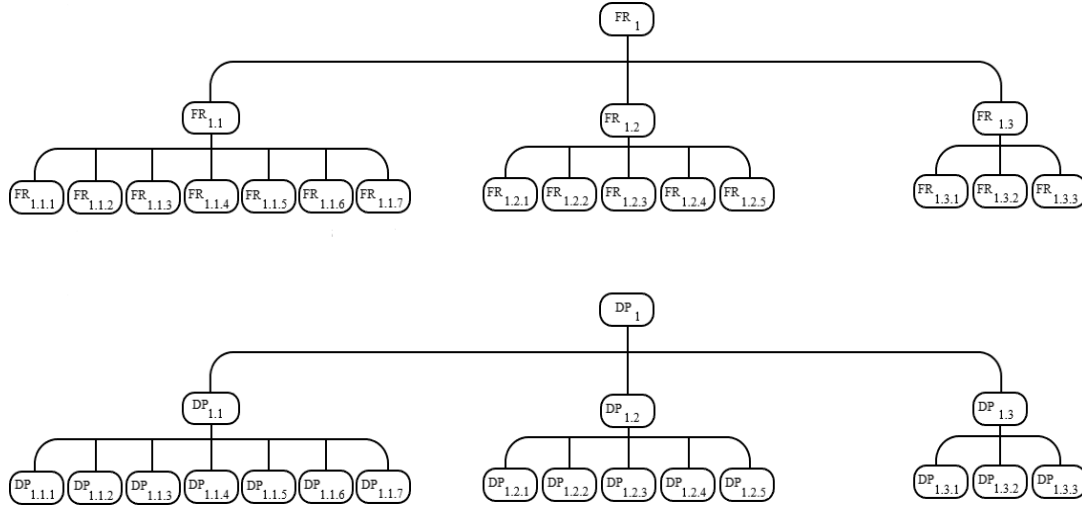


Figura 6.8: Diagramas de árvore parciais dos três primeiros níveis.

Adicionalmente é possível compilar as matrizes apresentadas anteriormente numa única matriz que corresponde à equação que caracteriza todo o terceiro nível, equação 6.5.

Da teoria axiomática sabe-se que qualquer associação de matrizes diagonais com matrizes triangulares inferior resulta numa matriz triangular inferior e por esta razão a matriz de projeto para este nível é característica de um projeto desacoplável.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.1} \\ FR_{1.1.2} \\ FR_{1.1.3} \\ FR_{1.1.4} \\ FR_{1.1.5} \\ FR_{1.1.6} \\ FR_{1.1.7} \\ FR_{1.2.1} \\ FR_{1.2.2} \\ FR_{1.2.3} \\ FR_{1.2.4} \\ FR_{1.2.5} \\ FR_{1.3.1} \\ FR_{1.3.2} \\ FR_{1.3.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.1} \\ DP_{1.1.2} \\ DP_{1.1.3} \\ DP_{1.1.4} \\ DP_{1.1.5} \\ DP_{1.1.6} \\ DP_{1.1.7} \\ DP_{1.2.1} \\ DP_{1.2.2} \\ DP_{1.2.3} \\ DP_{1.2.4} \\ DP_{1.2.5} \\ DP_{1.3.1} \\ DP_{1.3.2} \\ DP_{1.3.3} \end{Bmatrix} \quad (6.5)$$

6.4 Nível IV

Com os objetivos de garantir a qualidade dos *pellets*, de zelar pela integridade física do moinho 1 (moinho “verde”) e para assegurar que a matéria prima é devidamente triturada, surge a necessidade de remover agentes nocivos à produção. Quaisquer poeiras ou areias presentes na biomassa serão também inseridas no moinho 1. Adicionalmente, a presença de poeiras e areias dificulta a produção das *pellets* pois a sua presença dificulta a compactação da matéria-prima.

FR_{1.1.4.1} - Separar areias/poeiras da biomassa

Esta ação é feita pelo crivo, discutido anteriormente. Estas partículas por serem muito menores que os restantes elementos submetidos ao crivo, atravessam todas as chapas perfuradas do mesmo.

O movimento do crivo direciona estas partículas para a sua base, de onde são posteriormente removidas.

DP_{1.1.4.1} – Zona de aprisionamento de areias/ poeiras(presente no crivo)

De modo a evitar danificar o moinho responsável pela trituração da biomassa húmida, deve-se assegurar a retenção ou a eliminação de agentes que contribuam para a degradação do equipamento presentes na mistura.

Por seixos entendem-se todos os fragmentos rochosos cujo tamanho está compreendido entre os 4 mm e os 64 mm:

FR_{1.1.4.2} - Reter seixos

Sendo assim, o moinho está equipado com um módulo desacoplável, responsável pelo aprisionamento de tais detritos, na sua entrada:

DP_{1.1.4.2} - Módulo de aprisionamento de seixos

Um exemplo deste tipo de módulo encontra-se na figura 6.9. Nesta é possível identificar também alguns elementos que compõem um moinho de martelos.

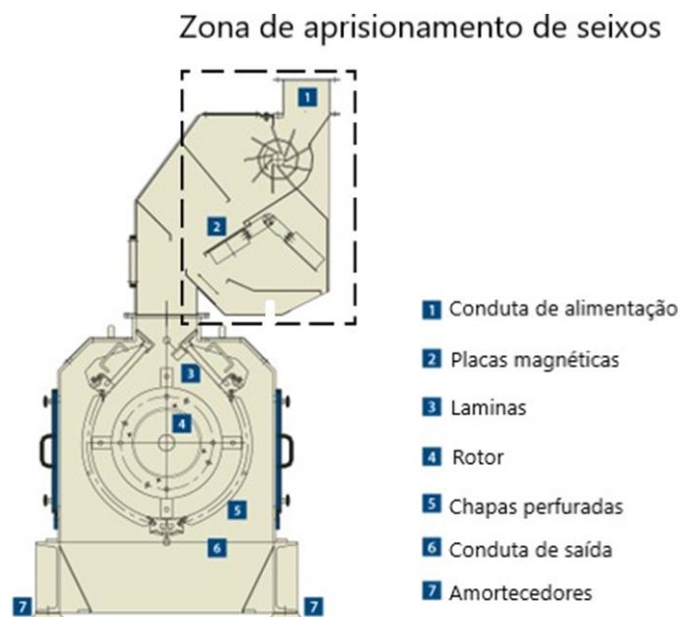


Figura 6.9: Moinho de martelos capaz de reter seixos [18].

Para garantir o bom funcionamento do moinho e para evitar a degradação das lâminas do mesmo, também é prudente evitar a entrada de fragmentos metálicos no moinho.

FR_{1.1.4.3} - Impedir a passagem de fragmentos metálicos

Parte destes fragmentos metálicos apresentam propriedades magnéticas e por isso a sua retenção é conseguida através da colocação de placas magnéticas. Estas placas estão dispostas tanto no moinho como ao longo das condutas que transportam a matéria-prima até o secador.

DP_{1.1.4.3} - Placas magnéticas

É necessário mencionar que as várias chapas perfuradas do crivo impedem a passagem de alguns seixos e por isso DP_{1.1.4.1} irá afetar FR_{1.1.4.2}.

Uma vez que o crivo é capaz de aprisionar fragmentos metálicos de dimensões

superiores a 15 mm, também irá ajustar $FR_{1.1.4.3}$.

Conforme as últimas observações, a equação que traduz as dependências neste conjunto de elementos terá o seguinte aspeto (equação 6.6):

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.4.1} \\ FR_{1.1.4.2} \\ FR_{1.1.4.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ x & x & 0 \\ x & 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.4.1} \\ DP_{1.1.4.2} \\ DP_{1.1.4.3} \end{Bmatrix} \quad (6.6)$$

Esta configuração matricial corresponde a um projeto desacoplável já que a matriz que resulta da análise das relações entre FRs e DPs é uma matriz triangular inferior.

A necessidade de aquecer e fornecer ar quente de forma constante ao secador implica a montagem de um sistema auxiliar. Este sistema tem como objetivo fornecer ar cuja pressão é superior à da atmosfera e aquecê-lo de forma a promover a secagem da matéria-prima:

$FR_{1.1.6.1}$ – Aquecer o ar utilizado no secador

Para este efeito é utilizada uma fornalha para cada um dos secadores:

$DP_{1.1.6.1}$ – Fornalha

Estas fornalhas apresentam temperaturas compreendidas entre 70 e 130 graus Celsius durante a sua utilização [19]. As figuras 6.10 e 6.11 ilustram o tipo de fornalha utilizada. Nestas é possível identificar alguns elementos de interesse, como por exemplo, a chaminé e as entradas de ar que servirão como mecanismos de ajuste no nível seguinte.



Figura 6.10: Vista frontal de uma das fornalhas na fábrica.



Figura 6.11: Vista lateral da fornalha da figura 6.10.

Estas fornalhas utilizam o pó de cortiça que é produzido noutra secção da fábrica. A implementação da nova linha de secagem contempla a montagem de uma fornalhas capaz de consumir tanto o pó de cortiça como serrim. Isto porque a empresa não é capaz de produzir pó de cortiça na quantidade necessária para alimentar todas as três fornalhas em simultâneo. Parte do serrim recebido é reservado para ser utilizado na nova linha de secagem.

Dada a importância da secagem na preparação da matéria-prima, assegurar que esta é feita de forma eficaz torna-se uma exigência da produção.

A eficácia da secagem resulta diretamente da humidade da biomassa medida à entrada e à saída do secador. Logo, garantir que toda a matéria-prima introduzida no secador é exposta de forma igual ao ar quente torna-se um aspeto imprescindível do processo de secagem:

***FR*_{1.1.6.2} - Homogenizar a secagem**

Como este tipo de secador em particular utiliza um fluxo de ar paralelo e com o mesmo sentido que a movimentação da matéria-prima, a homogenização da matéria-prima tem de ser alcançada através de outros mecanismos.

Neste caso a própria estrutura interna do secador promove a movimentação da biomassa e em simultâneo permite que esta fique exposta à ação do ar:

***DP*_{1.1.6.2} - Estrutura do secador**

O ar quente produzido nas fornalhas e utilizado nos secadores necessita de ser filtrado e desprovido de alguns contaminantes como a cinza, antes de entrar nos secadores:

***FR*_{1.1.6.3} - Filtrar o ar quente utilizado no secador**

Este ar é separado da matéria-prima e descontaminado, por meio de um sistema de filtração do ar antes de ser libertado para a atmosfera:

***DP*_{1.1.6.3} - Sistema de filtração de ar**

Novamente o conjunto de FRs e DPs descrito pode ser caracterizado através da equação 6.7:

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.6.1} \\ FR_{1.1.6.2} \\ FR_{1.1.6.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.6.1} \\ DP_{1.1.6.2} \\ DP_{1.1.6.3} \end{Bmatrix} \quad (6.7)$$

A equação apresenta-se na sua forma matricial e trata-se de uma matriz quadrada 3x3, característica de um projeto desacoplado.

Na sequência do sistema de desvio apresentado no subcapítulo designado de Nível III, evitar a contaminação da matéria-prima que ainda não foi afetada por as chamas de um incêndio torna-se imperativa:

FR_{1.3.2.1} - Impedir a passagem de matéria-prima para a zona em chamas

Como se pode observar na figura 6.12, é utilizada uma comporta acionada via pistão pneumático deste tipo, que neste caso tem que ser acionado remotamente por um operador a partir da sala de controlo. Assim é possível impedir a passagem da biomassa e do ar para a zona do fogo.

DP_{1.3.2.1} - Válvula guilhotina

Torna-se importante não só desviar o material afetado pelo fogo da linha de produção, mas também afastar este material da linha de secagem. A remoção da biomassa afetada da linha serve dois objetivos, impedir a contaminação da biomassa restante (a contaminação resultaria na diminuição da qualidade das *pellets*) e garantir que a linha e o espaço que a rodeia encontra-se limpo.

FR_{1.3.2.2} - Desviar da matéria-prima afetada para fora da linha

É utilizado um tapete rolante, que é uma estrutura relativamente barata em comparação com as demais para transportar este material até um silo, adaptado para a receção de matéria-prima afetado pelo fogo e afastado da linha.

DP_{1.3.2.2} - Transportador de correia 2



Figura 6.12: Válvula guilhotina pneumática [19].

Na figura 6.13, apresentam-se os ramos dos diagramas de árvore que foram decompostos neste nível e as ramificações que os antecedem.

Finalmente, apresenta-se a equação 6.8, na sua forma matricial. Esta por sua vez é composta pelas equações elaboradas neste subcapítulo. Esta trata-se de uma matriz triangular inferior correspondendo um projetodesacoplável.

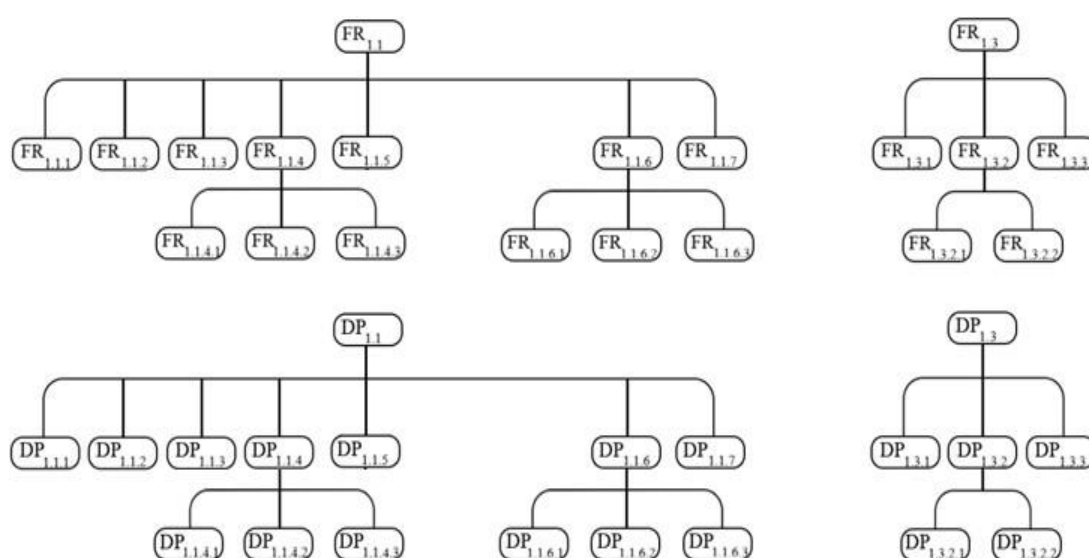


Figura 6.13: Diagramas de árvore parciais com início no segundo nível e fim no quarto nível do projeto.

$$\begin{pmatrix} FR_{1.1.4.1} \\ FR_{1.1.4.2} \\ FR_{1.1.4.3} \\ FR_{1.1.6.1} \\ FR_{1.1.6.2} \\ FR_{1.1.6.3} \\ FR_{1.3.2.1} \\ FR_{1.3.2.2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{1.1.4.1} \\ DP_{1.1.4.2} \\ DP_{1.1.4.3} \\ DP_{1.1.6.1} \\ DP_{1.1.6.2} \\ DP_{1.1.6.3} \\ DP_{1.3.2.1} \\ DP_{1.3.2.2} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

6.5 Nível V

Dado que se trata de uma linha de secagem é necessário considerar o ar quente como agente que proporciona a secagem:

FR_{1.1.6.1.1} - Prover a fornalha com combustível

Tal como indica o fluxograma da figura 6.8, a secagem utiliza o ar quente gerado nas fornalhas e a utilização de pó de cortiça como combustível:

DP_{1.1.6.1.1} - Pó de cortiça

As entradas de ar, presentes nas figuras 6.9 e 6.10 abastecem as fornalhas com ar vindo do exterior, é necessário fornecer um fluxo de ar pressurizado aos ciclones colocados à saída da fornalha:

FR_{1.1.6.1.2} - Manter um o fluxo de ar constante á saída da fornalha

O caudal é conseguido com a utilização de um compressor, figura 6.14.

DP_{1.1.6.1.2} – Compressor



Figura 6.14: Compressor utilizado para garantir o caudal de ar.

Dado que a fornalha é o único dispositivo responsável pela geração de ar quente para toda a linha de secagem, a monitorização do seu desempenho através da regulação da temperatura a que esta opera é relevante para este estudo:

FR_{1.1.6.1.3} - Regular a temperatura na fornalha

Um sem-fim é empregue no transporte do pó de cortiça desde o respetivo silo até a fornalha. A variação da velocidade de alimentação, por parte de um operador, é o único meio aplicado pela empresa para este objetivo.

DP_{1.1.6.1.3} – Transportador de parafuso sem-fim 3

Dado que o aprisionamento de gases, que não o ar quente, provenientes da combustão do pó de cortiça acabaria por contaminar a matéria-prima, é importante desenvolver uma via alternativa para o escape destes contaminantes:

FR_{1.1.6.1.4} – Libertar gases da combustão

Para purgar estes gases, cada uma das fornalhas está equipada com uma chaminé.

DP_{1.1.6.1.4} - Chaminé

Contudo, o projeto da terceira linha de secagem, como já foi mencionado, também contempla a utilização de serrim. Sendo assim surge um novo DP:

DP_{1.1.6.1.5} - Serrim

O funcionamento da fornalha, descrito pela seguinte matriz de projeto (equação 6.9), apresenta uma forma distinta das matrizes analisadas até agora.

Esta apresenta mais colunas do que linhas, isto é, apresenta um número de DPs superior ao número de FRs. Esta configuração é indicativa de um projeto redundante.

Projetos redundantes, também podem ser classificados como desacoplados, desacopláveis ou acoplados.

A matriz seguinte (equação 6.9), por conter um número de DPs maior que o número de FRs, corresponde a um projeto redundante e por esta razão, consequentemente, sem independência [20].

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.6.1.1} \\ FR_{1.1.6.1.2} \\ FR_{1.1.6.1.3} \\ FR_{1.1.6.1.4} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & x & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.6.1.1} \\ DP_{1.1.6.1.2} \\ DP_{1.1.6.1.3} \\ DP_{1.1.6.1.4} \\ DP_{1.1.6.1.5} \end{Bmatrix} \quad (6.9)$$

Uma vez que esta matriz pode ser transformada numa matriz composta por dois blocos triangulares, sendo um destes, parcial (equação 6.10), conclui-se que se trata de uma matriz correspondente a um projeto desacoplável [20]. Esta transformação é conseguida através de um par de transformações elementares. De modo a que a matriz passe a refletir um projeto desacoplado, é necessário trocar a posição do $DP_{1.1.6.1.2}$ pelo $DP_{1.1.6.1.3}$ e em seguida troca a posição do $FR_{1.1.6.1.2}$ pelo $FR_{1.1.6.1.3}$.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.6.1.1} \\ FR_{1.1.6.1.2} \\ FR_{1.1.6.1.3} \\ FR_{1.1.6.1.4} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & x & x & x & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.6.1.1} \\ DP_{1.1.6.1.2} \\ DP_{1.1.6.1.3} \\ DP_{1.1.6.1.4} \\ DP_{1.1.6.1.5} \end{Bmatrix} \quad (6.10)$$

Procede-se agora à decomposição do $FR_{1.1.6.2}$ – Homogenizar a secagem.

A matéria-prima, ao entrar no secador requer movimentação constante para eliminar a humidade retida pela mesma de forma eficaz. Para atingir este objetivo, é necessário que o ar aqueça a biomassa e assim poder secar o maior número de elementos possíveis:

$FR_{1.1.6.2.1}$ - Permitir que o ar quente passe pela mistura

Já o facto de ser utilizado um secador cujo fluxo de ar tem o mesmo sentido que a movimentação da matéria-prima (secador de fluxo paralelo) permite que a matéria-prima entre em contacto com o ar quente.

$DP_{1.1.6.2.1}$ - Fluxo de ar paralelo à matéria-prima

Uma vez que a transição da conduta para o secador é marcada por um aumento significativo na área pela qual o ar atravessa e, como consequência, dá-se uma perda de velocidade no mesmo, aumentando o risco de acumulação da biomassa nas paredes do secador.

$FR_{1.1.6.2.2}$ - Impedir a acumulação de matéria-prima na entrada do secador

Como se pode observar na figura 6.15, a região inicial do tambor do secador é dotada de cristas dispostas em espiral. Esta disposição age como uma rosca que promove a movimentação do material da entrada para a região central do secador.

DP_{1.1.6.2.2} - Superfície interna roscada

Uma vez dentro do secador, é necessário movimentar a matéria-prima desde a sua entrada até a sua saída:

FR_{1.1.6.2.3} - Movimentar a matéria-prima através do tambor

Para assegurar a movimentação em direção à saída do secador por parte da matéria-prima existem saliências em forma de pá, presentes na figura 6.16. Este efeito é auxiliado pela rotação do tambor.

DP_{1.1.6.2.3} - Saliências em forma de pá

DP_{1.1.6.2.4} - Rotação do tambor



Figura 6.15: Entrada de um secador de tambor rotativo [21].

Após discutir os requisitos e os parâmetros relativos à secagem da biomassa dentro do secador, é necessário analisar as dependências entre os mesmos.

Segundo a equação 6.11, que à semelhança das equações 6.9 e 6.10. reflete um projeto redundante visto que o número de DPs é superior ao número de FRs [20].

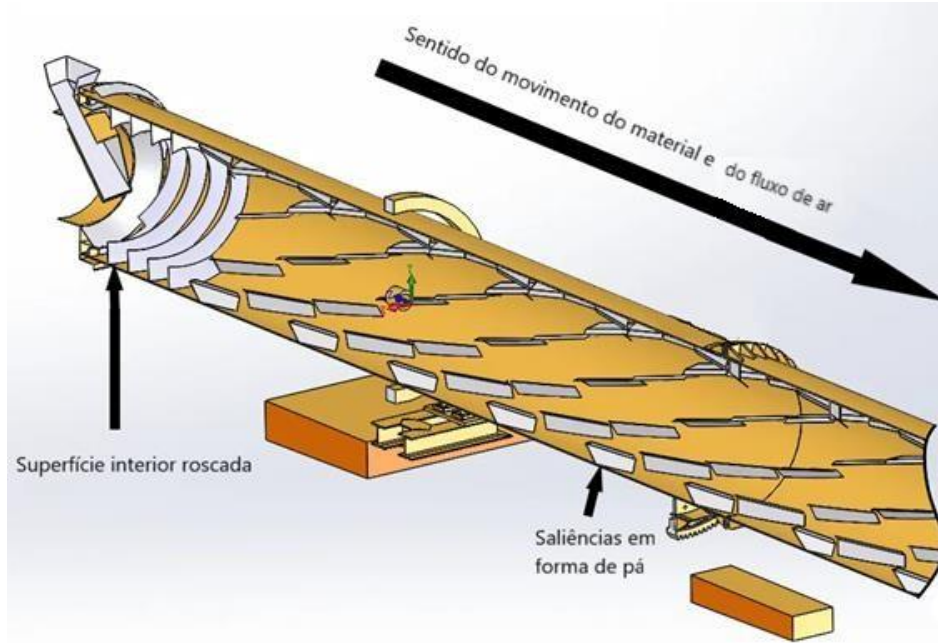


Figura 6.16: Estrutura interna de um secador de tambor rotativo [21].

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.6.2.1} \\ FR_{1.1.6.2.2} \\ FR_{1.1.6.2.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.6.2.1} \\ DP_{1.1.6.2.2} \\ DP_{1.1.6.2.3} \\ DP_{1.1.6.2.4} \end{Bmatrix} \quad (6.11)$$

Porém a sua forma matricial revela que cada coluna contém apenas uma entrada não nula e esta é a definição de uma matriz de projeto equivalente a um projeto desacoplado, caso se tratem de projetos redundantes ou não [20].

Como foi apresentado no subcapítulo anterior, existe sempre necessidade de filtrar o ar que é utilizado na secagem. Esta purificação do ar ocorre em dois instantes distintos. O primeiro destes sucede a fornalha:

FR_{1.1.6.3.1} - Filtrar os óxidos e resíduos formados durante a combustão do pó de cortiça na fornalha

Cada fornalha encontra-se acoplada a um par de ciclones. Estes permitem a passagem do ar enquanto que os produtos da combustão, por serem substancialmente mais pesados, descendem até a base dos mesmos onde são posteriormente recolhidos, figura 6.17 e figura 6.18.

***DP*_{1.1.6.3.1} - Conjunto de ciclones**



Figura 6.17: Ciclones em paralelo, montados na saída de cada secador.

Porém, os ciclones não são infalíveis e a própria secagem dentro do secador volta a contaminar o ar com partículas minúsculas de biomassa:

***FR*_{1.1.6.3.2} - Mitigar as emissões poluentes**



Figura 6.18: Cinza recolhida pelos ciclones.

A estação de filtragem e limpeza permite a limpeza do fluxo de ar proveniente do processo de secagem, figura 6.19.

DP_{1.1.6.3.2} - Estação de limpeza

Na figura 6.19, encontram-se as ramificações do $FR_{1.1.6}$, e os ramos que resultam da sua decomposição. Assim é possível observar o conjunto de requisitos e parâmetros abordados neste nível e onde se situam no diagrama de árvore.



Figura 6.19: Estação de limpeza e filtragem.

O quinto nível deste projeto está representado na figura 6.20, onde é possível observar o diagrama parcial do projeto e a decomposição dos elementos com a designação 1.1.6. A equação 6.12 ilustra a iteração entre os FRs e DPs que o compõem. Esta é uma matriz simbólica deste nível do projeto e é constituída por nove linhas e onze colunas. Como apresenta mais DPs do que FRs, corresponde a um projeto redundante. Também pode ser decomposta em duas submatrizes retangulares, uma com quatro linhas e cinco colunas e a outra com três linhas e quatro colunas, e uma matriz quadrada de segunda ordem, ou seja, é uma matriz trapezoidal. Segundo *António M. Gonçalves-Coelho et al* (2012), qualquer operação que envolva matrizes desacopladas e matrizes desacopláveis irá originar uma matriz desacoplável [20]. Adicionalmente, apenas projetos redundantes desacopláveis apresentam uma matriz trapezoidal, inferior ou superior [20].

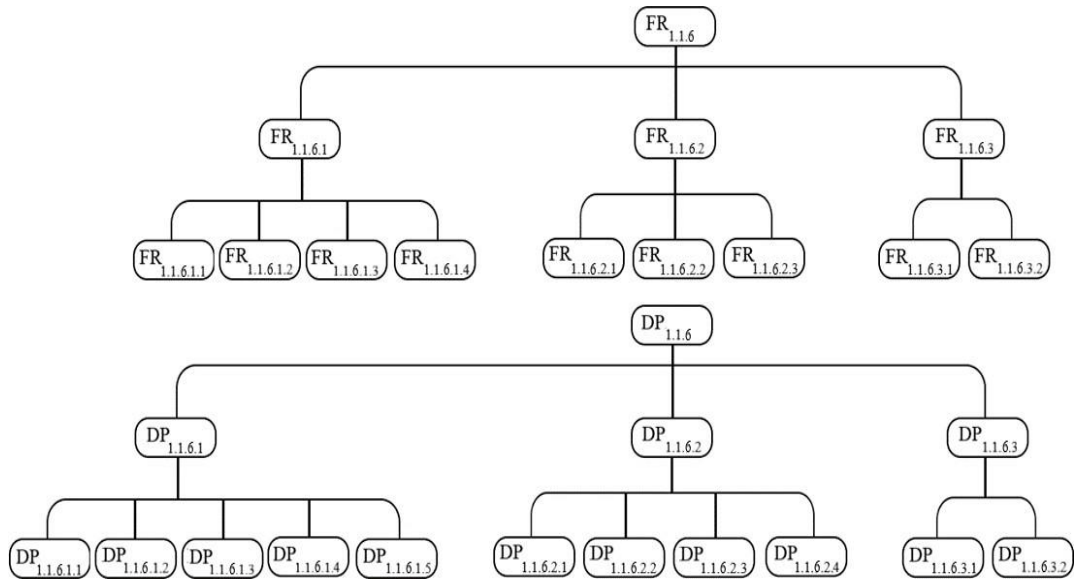


Figura 6.20: Diagramas de árvore parciais das ramificações do FR 1.1.6 e do DP 1.1.6.

$$\begin{pmatrix} \text{FR}_{1.1.6.1.1} \\ \text{FR}_{1.1.6.1.2} \\ \text{FR}_{1.1.6.1.3} \\ \text{FR}_{1.1.6.1.4} \\ \text{FR}_{1.1.6.2.1} \\ \text{FR}_{1.1.6.2.2} \\ \text{FR}_{1.1.6.2.3} \\ \text{FR}_{1.1.6.3.1} \\ \text{FR}_{1.1.6.3.2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boxed{\text{x}} & \boxed{\text{x}} & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & \boxed{\text{x}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{\text{x}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \text{DP}_{1.1.6.1.1} \\ \text{DP}_{1.1.6.1.2} \\ \text{DP}_{1.1.6.1.3} \\ \text{DP}_{1.1.6.1.4} \\ \text{DP}_{1.1.6.1.5} \\ \text{DP}_{1.1.6.2.1} \\ \text{DP}_{1.1.6.2.2} \\ \text{DP}_{1.1.6.2.3} \\ \text{DP}_{1.1.6.2.4} \\ \text{DP}_{1.1.6.3.1} \\ \text{DP}_{1.1.6.3.2} \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

6.6 Nível VI

Para mitigar as emissões provenientes do processo de secagem é utilizada uma estação de limpeza para as duas linhas de secagem existentes, cuja função principal é de alguma forma, remover os contaminantes presentes no ar utilizado:

***FR*_{1.1.6.3.2.1} - Descontaminar o ar antes deste ser libertado para a atmosfera**

Já o projeto para a terceira linha de secagem inclui a montagem de uma estação de limpeza própria.

Para realizar a descontaminação do ar é empregue um dispositivo denominado de *wet scrubber*, figura 6.21. Este utiliza vários níveis de aspersores, cuja disposição pode ser linear ou radial, para saturar o ar encaminhado para o dispositivo. O resultado é absorção dos contaminantes por parte da água vaporizada e a queda posterior da mesma. O ar, agora desprovido de contaminantes, apresenta níveis de humidade muito elevados e é libertado para a atmosfera através de chaminés.

DP*_{1.1.6.3.2.1} - *Wet scrubber

Após a pulverização do ar, qualquer poluente é transportado pela água e pela ação da gravidade até a base da estação. Contudo, de modo a não escoar o líquido contaminado, é necessário retê-lo:

***FR*_{1.1.6.3.2.1} - Reter a água contaminada**

Para não contaminar o solo e para promover condições higiénicas na fábrica, a estação de limpeza está equipada com um reservatório. Este, quando cheio pode ser drenado e assim transferido o seu conteúdo para um camião cisterna. A água utilizada na descontaminação do ar provém de um reservatório distinto do reservatório que retém a água contaminada.

***DP*_{1.1.6.3.2.2} – Reservatório**

Como se pode observar no diagrama de árvore parcial da figura 6.22, este conjunto de FRs e DPs têm origem na decomposição do $FR_{1.1.6.3.2}$ e do $DP_{1.1.6.3.2}$, ambos do quinto nível.

Uma vez que este último nível é composto por dois pares de FRs e DPs, a sua matriz de projeto será quadrada, equação 6.23.

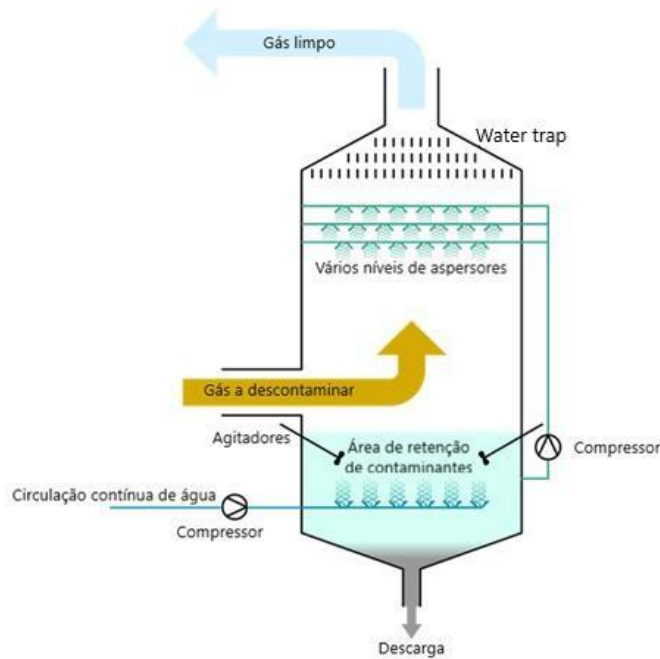


Figura 6.21: Diagrama simplificado de um Wet Scrubber.

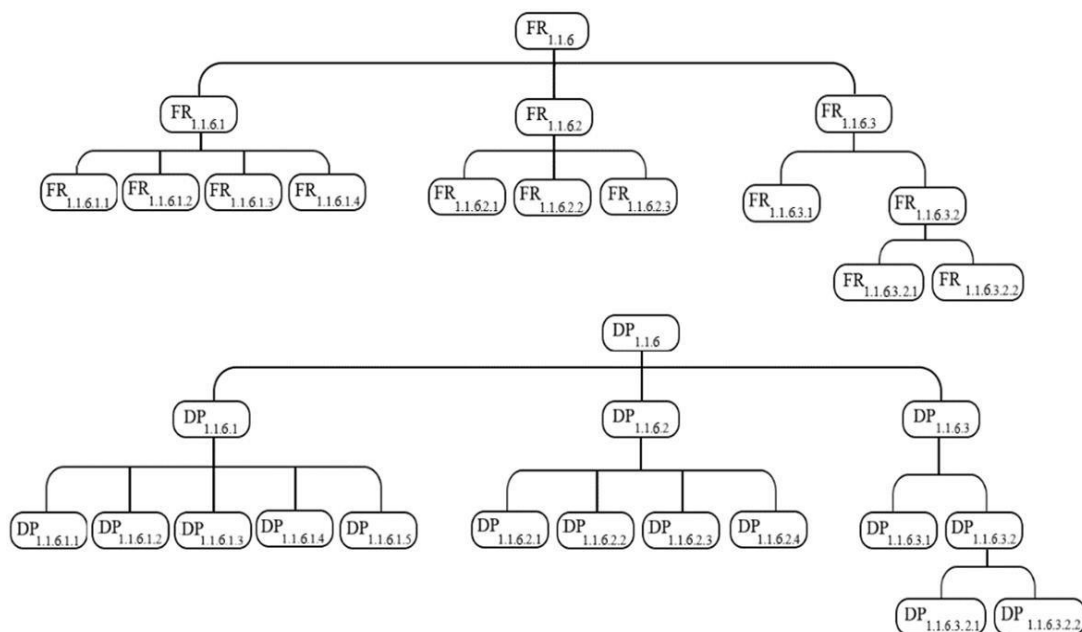


Figura 6.22: Diagramas de árvore parciais relativos à decomposição do $FR_{1.1.6}$ e do $DP_{1.1.6}$. Tem início no nível III e fim no nível VI

Dado que o mecanismo responsável pela descontaminação do ar não tem influência no funcionamento do reservatório, a equação será diagonal.

Por esta razão considera-se o projeto desacoplado.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1.6.3.2.1} \\ FR_{1.1.6.3.2.2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1.6.3.2.1} \\ DP_{1.1.6.3.2.2} \end{Bmatrix} \quad (6.13)$$

Por fim apresentam-se os diagramas de árvore completos para o projeto da terceira linha de secagem, figura 6.23.

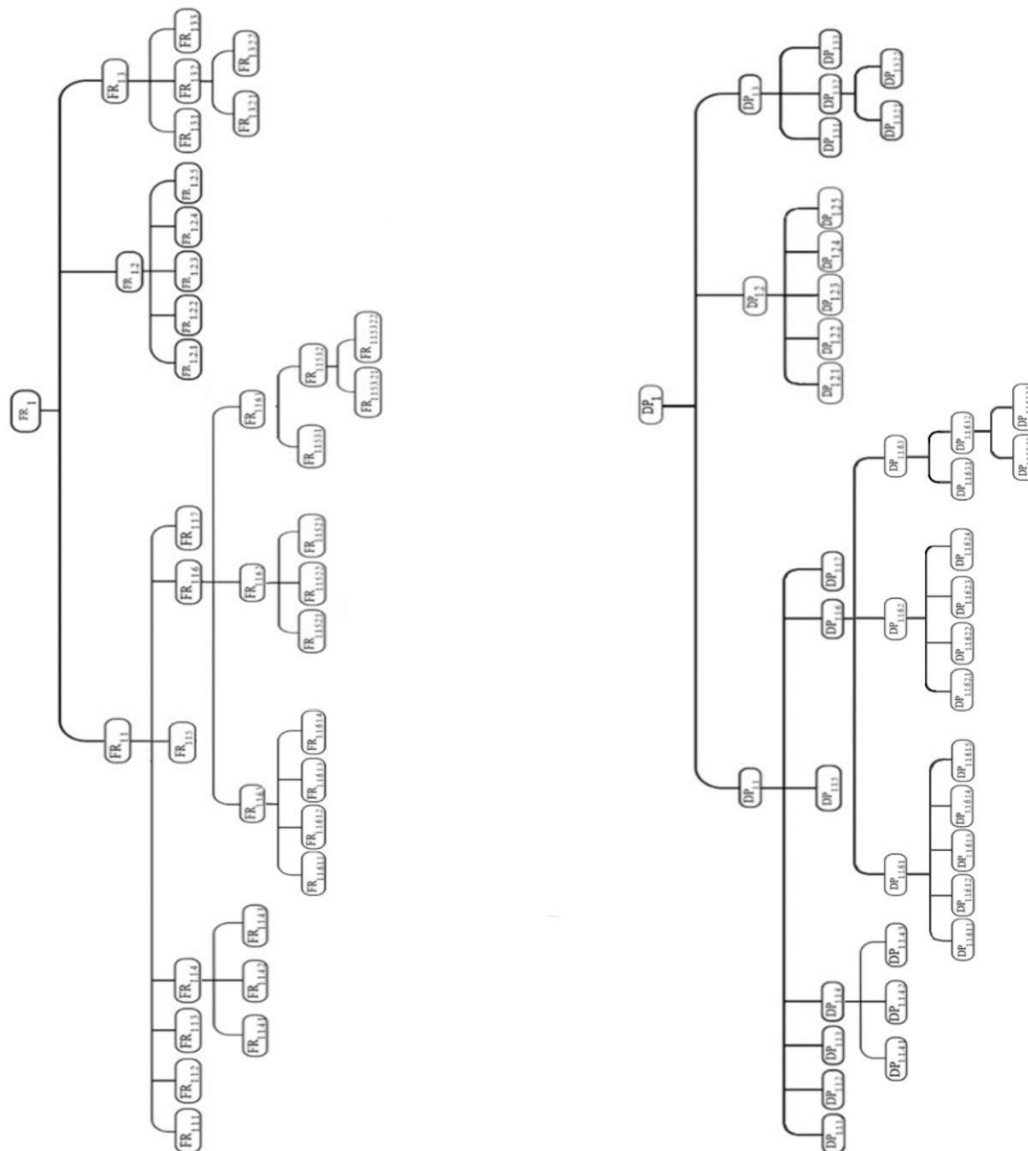


Figura 6.23: Diagramas de árvore completos.

O quinto nível deste projeto, caracterizado pela equação 6.12, apresenta duas dependências indesejadas contidas na equação 6.10, pelo que se trata de uma matriz redundante. Tanto a redundância como as dependências fora da diagonal principal são impossíveis de eliminar. Isto porque refletem o funcionamento do equipamento escolhido e as funções que desempenham no processamento da biomassa.

Sendo assim, propõem-se as seguintes transformações elementares na equação 6.10 de modo a que todas as dependências se encontrem abaixo da diagonal principal.

Primeiramente trocam-se as posições do $FR_{1.1.6.1.1}$ - "Prover a fornalha com combustível" e do $FR_{1.1.6.1.4}$ - "Libertar gases da combustão". Em seguida trocam-se as posições de dois DPs, o $DP_{1.1.6.1.1}$ - "Pó de cortiça" e o $DP_{1.1.6.1.4}$ - "Chaminé".

Este par de transformações origina a seguinte equação, equação 6.15, que ainda apresenta dependências em posições indesejadas. Por isso recorre-se a um novo par de transformações elementares ao trocar as posições do $FR_{1.1.6.1.2}$ - "Manter um caudal de ar constante à saída da fornalha" e do $FR_{1.1.6.1.3}$ - "Regular a temperatura da fornalha", seguida da mesma operação aplicada ao $DP_{1.1.6.1.2}$ - "Compressor" e ao $DP_{1.1.6.1.4}$. Obtém-se assim a equação 6.16.

$$\begin{pmatrix} FR_{1.1.6.1.4} \\ FR_{1.1.6.1.2} \\ FR_{1.1.6.1.3} \\ FR_{1.1.6.1.1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{1.1.6.1.4} \\ DP_{1.1.6.1.2} \\ DP_{1.1.6.1.3} \\ DP_{1.1.6.1.1} \\ DP_{1.1.6.1.5} \end{pmatrix} \quad (6.15)$$

$$\begin{pmatrix} FR_{1.1.6.1.4} \\ FR_{1.1.6.1.3} \\ FR_{1.1.6.1.2} \\ FR_{1.1.6.1.1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ x & x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{1.1.6.1.1} \\ DP_{1.1.6.1.3} \\ DP_{1.1.6.1.2} \\ DP_{1.1.6.1.4} \\ DP_{1.1.6.1.5} \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

Com esta alteração, esta matriz, passa a ter a mesma configuração que as restantes matrizes presentes na equação 6.12, especialmente as equações 6.4 e 6.6. Uma vez feitas as alterações no projeto, é possível construir uma nova matriz de projeto global, equação

6.17.

A equação 6.17, apesar de ainda não corresponder ao projeto ideal, é um projeto com menos dependências que o projeto inicial. Esta, por apresentar dependências apenas na sua metade inferior, corresponde a projeto desacoplado.

[illegible]

7 Análise da linha de secagem segundo DfM

Uma vez abordados os princípios envolvidos na criação de um plano de manutenção no capítulo 4, é então possível proceder à análise da linha de secagem projetada segundo o DfM.

Neste capítulo serão abordados os dispositivos essenciais à secagem da matéria-prima, nomeadamente, o crivo, o moinho "verde", a fornalha, o secador, o moinho seco e os transportadores de correia.

Os dispositivos mencionados serão submetidos aos seguintes paradigmas, provenientes do DfM e apresentados no capítulo 4:

- Estandarização
- Modularização
- Desenvolvimento de conjuntos completos
- Intermutabilidade
- Acessibilidade
- Detecção de falhas
- Isolamento de falhas
- Identificação de componentes

A empresa, até o momento não possui os chamados conjuntos completos (*complete kits*) da maior parte da maquinaria presente. Isto é, a equipa técnica não possui a documentação relacionada com a operação e a montagem da maquinaria utilizada na secagem da biomassa.

Os atuadores, transportadores de correia e os motores elétricos utilizados em várias áreas da fábrica são modelos estandardizados que podem ser substituídos com facilidade.

No que toca à deteção e isolamento de falhas, o método utilizado para a grande parte dos dispositivos, principalmente para aqueles de maior porte, é a inspeção visual ou auditiva, salvas algumas exceções em que foram instalados dispositivos próprios para o controlo dos parâmetros de funcionamento.

Começando pelo crivo, este é o primeiro dispositivo no qual a matéria-prima é processada. É composto por três subconjuntos: a estrutura de suporte, as chapas perfuradas e o motor ligado à haste central. Com esta descrição é evidente que este sistema é um sistema modular e por isso respeita um dos princípios do *Design for Maintainability*.

Outro princípio considerado no projeto deste dispositivo foi a acessibilidade às diferentes partes da máquina. A geometria simples do crivo não só facilita a introdução da matéria-prima, mas também facilita o acesso a qualquer parte da máquina, seja por parte de um técnico ou o equipamento necessário à manutenção (figuras 7.1 e 7.2). Este último ponto torna-se evidente quando se considera a posição do crivo. Este encontra-se adjacente ao moinho 1, que é responsável pela trituração da matéria-prima húmida, contudo encontra-se a distância segura de qualquer outro equipamento.

A sua geometria simples, juntamente com o facto do espaço em volta do crivo se encontrar desobstruído promovem a deteção de quaisquer danos nos componentes da máquina, mesmo a olho nu.



Figura 7.1: Crivo desativo. Este é igual àquele atualmente utilizado na fábrica.

Já o moinho 1 encontra-se dentro de uma estrutura própria. Esta é inteiramente feita de chapa e é dotada de uma porta deslizante que age como uma das paredes. Deste modo, a máquina é protegida da corrosão causada pelas condições ambientais e pela acumulação de detritos e poeiras criados dentro da própria fábrica. Refira-se, no entanto, que a porta deslizante também promove o acesso rápido à máquina, porém, o espaço

limitado dentro da cobertura em conjunto com a dimensão do moinho dificulta o uso de peças, ferramentas.



Figura 7.2: Silo e crivo (assinalado com um contorno verde).

O moinho 1 apresenta três secções distintas, a conduta de entrada, a câmara de trituração e a secção de saída. Apesar de ser possível distinguir as secções distintas, todos os constituintes de uma dada secção têm de ser montados/desmontados individualmente, daí não ser possível substituí-los de forma rápida.

A substituição de componentes críticos ao funcionamento do moinho é também dificultada pelo facto de a empresa não possuir elementos suplentes em reserva e por isso ter que os adquirir no momento em que o elemento danificado é identificado.

A fornalha, mais que qualquer outro equipamento presente na fábrica, adere aos princípios da standardização, da modularização, da acessibilidade e da detecção de falhas dado que é um dispositivo simples em termos de montagem e operação.

Sendo composta pela câmara de combustão, a porta de acesso, que permite a inspeção do interior da câmara de combustão, as condutas de entrada de ar, o compressor e a chaminé. Logo a delimitação dos componentes da máquina corresponde à modularização que juntamente com a porta de acesso permitem acesso rápido a qualquer parte da máquina. Já a detecção de falhas no funcionamento é conseguida através da implementação de um sensor de temperatura montado na parede lateral exterior da câmara

de combustão.

À semelhança da fornalha, o secador, devido ao seu modo de funcionamento e devido à sua montagem, é também simples de analisar. Enquanto que o acesso aos elementos responsáveis pelo funcionamento do mesmo é facilitado pelo facto de este ser apenas movido através de duas rodas motoras montadas na proximidade da entrada e apoiado por duas rodas na extremidade oposta, estes elementos encontram-se expostos, figura 7.3. O facto destes elementos se encontrarem expostos obriga a empresa a efetuar a sua limpeza periodicamente.

Nesta nova linha de secagem, o secador é montado, à semelhança das outras linhas de secagem, numa plataforma elevada, juntamente com o equipamento necessário para filtrar o ar e a biomassa.

A posição em que o equipamento foi montado nas linhas existentes na plataforma dificulta a manutenção. As operações de manutenção no próprio secador ou nos ciclones, é dificultada senão mesmo impossível sem que seja preciso desmontar componentes de várias máquinas ao mesmo tempo. Isto porque o espaço necessário para acomodar os técnicos, bem como o equipamento auxiliar de grandes dimensões, não foi considerado na montagem da maquinaria na plataforma.

A necessidade de desativar várias máquinas em simultâneo de modo a prover o espaço necessário para realizar uma operação de manutenção leva a um aumento no tempo necessário à manutenção. Dado o volume de material que a fábrica necessita de processar para poder ter uma produção contínua de *pellets*, é evidente que este aspeto requer atenção especial.



Figura 7.3: Motor de indução e elementos móveis do secador. Estes estão montados num dos flancos do secador, sob a entrada do mesmo.

À semelhança do moinho destinado à trituração dos elementos húmidos, o segundo moinho da linha também está contido numa estrutura metálica que o protege e diminui o nível de poluição produzida pelo mesmo, tanto atmosférica como sonora. Assim partilha todas as vantagens e desvantagens aplicáveis ao primeiro moinho com a exceção do facto de este apenas reduzir a dimensão de elementos secos, logo o esforço a que a máquina está exposta é menor. Por esta razão, o teorema 4 do DfM, "efetuar a manutenção apenas quando necessário" (*Migrate from scheduled maintenance to condition-based maintenance*) torna-se exequível dada a longevidade deste dispositivo e a possibilidade de acompanhar a condição física do equipamento durante o seu tempo de serviço [11][12]. Esta abordagem permite prever de forma exata o momento em que ocorre uma falha no funcionamento devido à degradação física dos componentes do dispositivo. Porém são utilizadas novamente a inspeção visual, sonora e a avaliação do *output* da máquina como meios de deteção de falhas.

Por último, têm-se os transportadores de correia. Estes, devido à sua aplicabilidade e versatilidade, são utilizados em quase todo o tipo de operações dentro do mundo industrial e como tal os elementos que os compõem, desde elementos de ligação e a estrutura de suporte até aos elementos motores são elementos standardizados.

Como foi descrito anteriormente, este tipo de dispositivo pode ser decomposto em três módulos, os atuadores, a estrutura de suporte e os elementos móveis. Apesar de se tratarem de grupos de elementos separados, qualquer falha nos elementos motores ou nos elementos de ligação irá condicionar o funcionamento da máquina negativamente.

O tipo de tapete rolante presente na fábrica não possui nenhum tipo de cobertura exceto um par de chapas colocadas na lateral dos tapetes. Estas coberturas cumprem dois objetivos: impedir a acumulação de detritos no espaço entre as duas faces da correia, e assim zelar pelo funcionamento dos rolos de apoio da correia, bem como servir de suporte aos rolos guia. A compartimentação dos elementos que compõem o transportador e a natureza standardizada destes, traduz-se numa máquina acessível e adaptável a qualquer operação de manutenção.

Em termos gerais, a montagem e a escolha do equipamento da linha de processamento da matéria-prima apresentam aspetos do *Design for Maintainability* tais como a escolha de dispositivos compostos por elementos standardizados e agrupados em módulos cuja reparação ou remoção é relativamente simples.

Tal como foi discutido anteriormente, muitas destas escolhas foram baseadas na experiência empírica dos responsáveis. Como tal a caracterização dos dispositivos, conforme os princípios do DfM com a exceção de um, “desenvolvimento de conjuntos completos”, uma vez que este diz respeito ao fabricante do equipamento, encontra-se na

tabela 5. Assim resume-se a informação apresentada neste capítulo.

Tabela 5: Resumo da adesão aos princípios do DfM nos vários dispositivos da linha de secagem.

Dispositivos	Estandardização	Modularização	Intermutabilidade	Acessibilidade	Deteção de falhas	Isolamento de falhas	Identificação
Crivo	×	✓	×	✓	✓	×	✓
Moinho de martelos	✓	×	×	✓	×	×	✓
Caldeira	×	✓	✓	✓	✓	×	✓
Secador	✓	×	×	×	×	×	×
Tapetes rolantes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Conduta pneumática	✓	×	×	✓	×	×	✓
Ciclones	✓	✓	×	✓	×	×	✓
Filtro de mangas	✓	✓	×	✓	×	×	✓

7.1 Possíveis soluções de acordo com o DfM

Uma vez abordados o processo e o equipamento empregues pela empresa na secagem da biomassa detetaram-se dificuldades no processo bem como a sua génese.

Dada a descrição da linha de secagem e a sua análise segundo a Teoria do Axiomática de Projeto e segundo o DfM, efetuadas nos capítulos anteriores, é evidente que o processamento da matéria-prima carece de uma revisão.

Para este fim, serão apresentados não só novos elementos a adicionar a todas as linhas de secagem. Elementos esses que irão refletir não só as necessidades da fábrica, mas também vários princípios provenientes do DfM aplicáveis ao processo de secagem da matéria-prima, com o objetivo de converter o projeto exposto anteriormente num projeto mais eficiente no que toca à secagem da matéria-prima, mas também num projeto resiliente e com respostas eficientes a possíveis falhas.

De acordo o segundo teorema do DfM, apresentado no capítulo 5, o grau de manutenibilidade de um dado sistema é sempre proporcional à magnitude de testes que podem ser aplicados ao mesmo (primeiro teorema do DfM) e por esta razão é benéfico que todas as máquinas utilizadas no processamento da matéria-prima possam ser equipadas com dispositivos que permitam avaliar o desempenho das mesmas.

Assim é possível decompor a monitorização sugerida de acordo com a máquina ou conjunto de máquinas a avaliar. No caso dos transportadores pneumáticos é prudente avaliar o fluxo de biomassa transportado.

Monitorizar o fluxo de matéria-prima no transportador pneumático através de um contador de partículas.

Por esta razão acredita-se que a presença de um sensor de fluxo e um contador de partículas, em locais onde o controlo da quantidade de matéria-prima é difícil de quantificar, é benéfico.

O primeiro assegura indiretamente o fluxo e a massa de ar para que estes se mantenham constantes durante a operação ao indicar quaisquer falhas que permitam a saída do gás. A diminuição dos valores normalmente indicados pelo sensor informa o operador na sala controlo, permitindo ao mesmo atuar sobre a falha.

Desta forma é também possível respeitar o nono teorema do DfM pois a recolha e armazenamento dos dados recolhidos por estes dispositivos irão servir como base de comparação para operações de manutenção e para operações de otimização da linha futura.

Para o silo intermédio, que recebe toda a biomassa seca e que por sua vez abastece o moinho "seco", a instalação de um controlador de peso, como uma báscula no próprio silo permite ativar as linhas de secagem apenas quando necessário para possibilitar a operação do moinho. Desta forma é possível mitigar os custos de produção. Dado que os silos que abastecem as prensas são semelhantes ao silo anterior, a instalação de básculas nestes permite quantificar a matéria-prima que é perdida na moagem da biomassa seca, facultando, novamente, operações de otimização futuras.

Monitorizar a quantidade de matéria-prima processada presente nos silos com uso de básculas.

No que toca ao módulo de secagem, o controlo da temperatura apenas é viabilizado pelo sensor de temperatura instalado na superfície exterior das fornalhas em cada linha.

De modo a reduzir o risco de incêndios dentro dos secadores e nas secções da tubagem que os sucedem, sugere-se a instalação de sensores de temperatura nos transportadores pneumáticos. Adicionalmente a instalação de sensores de CO₂ pode ser benéfica uma vez que podem auxiliar na deteção e o isolamento de incêndios caso

existam.

Monitorizar a temperatura do ar e detetar indícios de incêndios no módulo de secagem através de um sistema automático.

O desempenho e os parâmetros de funcionamento dos elementos motores e dos transportadores de correia já se encontram monitorizados pela fábrica. A partir de uma consola central é possível ajustar os ditos parâmetros de funcionamento, contudo este ajuste ainda é manual uma vez que carece a intervenção de um operador.

Sendo assim o próximo passo seria proceder à automatização do ajuste dos parâmetros de funcionamento, não só para os transportadores, mas sim para todos os dispositivos envolvidos no pré-processamento da biomassa e de forma constante.

A implementação das leituras dos parâmetros de funcionamento dos vários dispositivos apresentados, aliados ao armazenamento das mesmas, proporcionaria ao sistema de ajuste automático uma base de comparação para efetuar os ajustes necessários. Desta forma é também possível respeitar o nono teorema do DfM pois a recolha e armazenamento dos dados recolhidos por estes dispositivos irão servir como base de comparação para operações de manutenção e para operações de otimização da linha futuras.

Construir uma base de dados com a informação recolhida pelo sistema de monitorização.

A ausência de conjuntos completos relativos à maquinaria presente leva à violação de um dos princípios do DfM e por isso torna imperativa listagem de componentes não estandardizados na maquinaria utilizada e a consequente aquisição de peças suplentes.

Outra boa prática a implementar é a listagem de todos os componentes ou peças não estandardizados e a aquisição daqueles designados como cruciais ao funcionamento ótimo dos dispositivos aos quais pertencem.

Aferir a existência de elementos não estandardizados.

Esta ação visa mitigar o impacto negativo da ausência de conjuntos completos (*complete kits*) que resulta na impraticabilidade do regime de manutenção que visa a

manutenção ou substituição das peças defeituosas apenas quando ocorre uma falha crítica, a manutenção corretiva.

Ao possuir acesso rápido a este tipo de componentes, a fábrica tem a liberdade de calendarizar os instantes de manutenção sem constrangimentos provenientes de terceiros.

Já no caso em que ocorre uma ou mais falhas críticas ao longo da linha a presença de componentes não estandardizados suplentes significa que a equipa técnica consegue proceder imediatamente às reparações necessárias, diminuindo o tempo em que a linha de produção está inoperacional. Caso contrário qualquer dano crítico nestes componentes leva à desativação da linha secagem até que a peça suplente seja encomendada e entregue.

Garantir a disponibilidade de componentes não estandardizados ao construir um stock permanente dos mesmos.

Dadas as condições que tornam a adesão completa ao quarto teorema do DfM, em que a manutenção é efetuada exclusivamente no caso de uma falha crítica de um elemento, pouco apelativa para este projeto, é então prudente contemplar a integridade da maquinaria como prioridade.

Assim a elaboração de um plano de manutenção específico aos elementos responsáveis pelo pré-processamento do material torna-se uma opção apelativa.

Ao diminuir a ocorrência de falhas que levem à paragem da produção, aumenta o seu grau de confiabilidade (*Reliability*) do sistema como um todo.

Dito isto, à medida que a manutenibilidade do sistema aumenta, o seu de confiabilidade diminui, pois, a necessidade de efetuar qualquer tipo de manutenção advém do facto de o sistema ser propício ao aparecimento de falhas.

Como o pré-processamento da biomassa é, como foi discutido, um sistema que requer um grau elevado de manutenção, a sua otimização passa por aumentar o seu grau de manutenibilidade. Para atingir este fim, a empresa deve reunir todas as condições necessárias para que as operações de manutenção, de qualquer tipo, possam decorrer de forma ótima e com a garantia de segurança [12] [13]. Esta condição, por sua vez, pode ser decomposta em quatro novas condições, como indica a figura 7.4.

Assegurar a integridade da maquinaria presente através da adesão de um plano de manutenção preventiva adequado às necessidades de cada máquina.

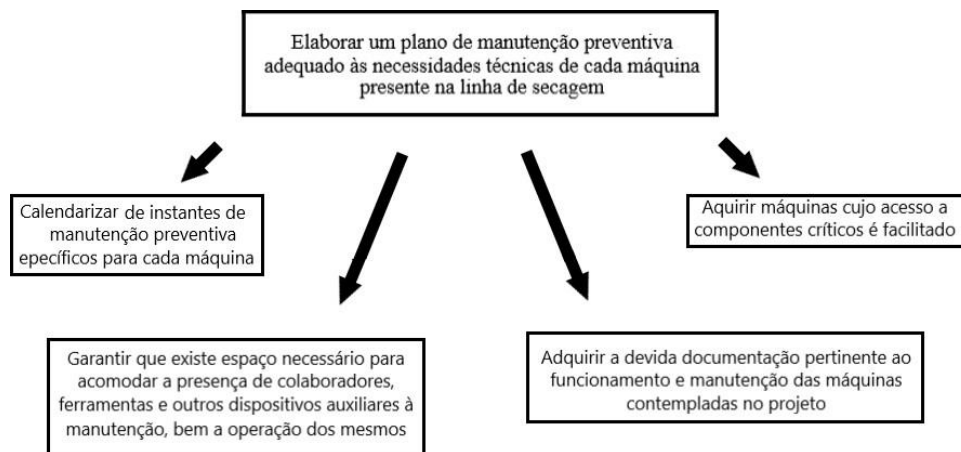


Figura 7.4: Requisitos inerentes à criação de um regime de manutenção.

Com base no estudo das linhas de secagem, acredita-se que a melhor forma de prevenção das falhas mencionadas é através da calendarização da manutenção em vez da manutenção exclusivamente corretiva que é praticada atualmente.

Calendarização dos instantes de manutenção preventiva.

O equipamento auxiliar usado na manutenção da secção da fábrica responsável pela preparação da matéria-prima também deve ser contemplado no projeto, principalmente na posição da maquinaria. Certos elementos da preparação da biomassa requerem andaimes, elevadores ou outras máquinas pesadas para que a sua manutenção possa decorrer em segurança.

A manutenção das duas linhas de secagem é dificultada pela posição da maquinaria e pelo facto de partilharem a mesma estação de limpeza. Presentemente não existe espaço suficiente para acomodar os responsáveis pela manutenção e o equipamento auxiliar mencionado daí ser necessário desmontar alguns elementos periféricos para que se consiga efetuar a manutenção.

Dito isto, torna-se imperativo reconsiderar a posição e o espaço entre os elementos que compõem o projeto da nova linha de secagem.

Espaçar os elementos do módulo de secagem de tal modo que permita qualquer tipo de manutenção.

Para além da periodicidade da manutenção, do espaço reservado para efetuar a mesma e do inventário de peças não standardizadas, a otimização da manutenção também envolve a diminuição do tempo da operação em si e do tempo até que o objeto da operação volte a estar operacional, o *down time*. Como foi discutido anteriormente, o tempo necessário à verificação da máquina antes desta ser ativada é algo constante. Logo a diminuição do *down time* advém da diminuição do tempo de reparação.

A experiência adquirida pelos responsáveis quando aplicada em máquinas, cujo acesso aos componentes críticos não requer a remoção de componentes adicionais ou é de outro modo facilitado, resulta numa intervenção muito mais rápida.

Logo a procura e aquisição de maquinaria com estas características e a substituição de equipamento cuja manutenção é difícil prova ser um investimento benéfico para a produção [11].

Promover a celeridade na manutenção ao adquirir dispositivos com acesso aos componentes críticos facilitado.

Tabela 6: Tabela resumo dos problemas identificados através do DfM e possíveis soluções.

Problema	Solução	Teoremas do DfM utilizados
Falta de monitorização da quantidade de matéria-prima nos transportadores pneumáticos	Instalação de vários contadores de partículas no módulo de secagem, nomeadamente, entre o par de ciclones e o secador e após o secador e o segundo par de ciclones	II, VII, VIII, IX
Interrupção da produção devido à falta de biomassa nos silos temporários	Instalação de um sistema de pesagem Implementação de um sistema de alimentação aos silos temporários automático	II, VII, VIII, IX
Pouca informação sobre as condições térmicas dentro do módulo de secagem	Instalação de sensores de temperatura adicionais Instalação de sensores de CO ₂	II, IV, VII, IX
Carência de registo dos parâmetros de produção	Implementação de um sistema automático para a recolha de informação pertinente à produção	VII, VIII, IX
Redução na produção devido ao ajuste manual dos parâmetros de produção	Implementação de um sistema automático capaz de ajustar os parâmetros de produção através dos dados recolhidos	I, VII
Aumento do tempo de manutenção devido à falta de componentes não standardizados em <i>stock</i>	Catalogar os componentes não standardizados Adquirir componentes suplentes	V, VI
Deterioração excessiva em certos elementos da linha de secagem	Elaborar um plano de manutenção preventiva adequado às necessidades técnicas de cada máquina presente na linha de secagem	IV, V, VI, VIII

7.2 Outras soluções

Dado que a matéria-prima recolhida é armazenada ao ar livre, a perda da mesma devido aos elementos (a chuva e o vento), bem como o aumento dos níveis de humidade durante o Inverno, são inevitáveis.

Uma possível solução passaria por armazenar a matéria-prima recolhida num espaço coberto no recinto. Esta cobertura deve ser apenas superior para permitir a ventilação do espaço e evitar aumentar a temperatura da biomassa em repouso.

Evitar a perda de matéria-prima em repouso através da construção de uma estrutura coberta.

Esta cobertura diminuiria os níveis de humidade do material em repouso na fábrica durante o outono e o inverno, porém esta também implica um aumento drástico da temperatura de alguns elementos durante o Verão, nomeadamente da estilha e do serrim. O aumento da temperatura promove o processo de fermentação nos compostos orgânicos, podendo inviabilizar parte da matéria-prima, para além de aumentar o risco de incêndio.

Mitigar o risco de combustão da matéria-prima recolhida ao alternar a utilização dos espaços designados para o armazenamento da biomassa consoante o período do ano.

Este novo espaço coberto não teria de ser uma estrutura nova pois já é utilizada uma estrutura semelhante no armazenamento de *pellets*. Por esta mesma razão bastaria uma ampliação do espaço coberto atual. O novo espaço, resultante da ampliação, ocuparia a zona que, até o momento, serve como depósito de equipamento desativado, de acordo com a figura 7.5.



Figura 7.5: Vista aérea das instalações da empresa, destacando-se as zonas de interesse, adaptado de [23].

Finalmente, um possível complemento às três linhas de secagem seria a incorporação de um secador adicional, para o qual a biomassa proveniente da secagem converge. Este novo secador seria colocado logo após o moinho 2 (também designado de moinho "seco") e alimentado através de um transportador de parafuso sem-fim [22].

Reduzir a humidade intrínseca da biomassa em duas fases distintas com a montagem de um secador adicional.

Uma vez que as três linhas de secagem convergem para os dois silos adjacentes à produção de *pellets*, que são responsáveis por alimentar a mesma, torna-se benéfico instalar um secador, com dimensões superiores aos que se encontram nas linhas de secagem.

Desta forma os secadores nas linhas individuais seriam responsáveis por efetuar apenas uma secagem parcial da matéria-prima enquanto que o novo secador completaria a secagem de todo o material proveniente das linhas que o antecedem. O material resultante apresentaria níveis de humidade dentro do intervalo desejado sem comprometer o fluxo de material a ser processado uma vez que as partículas que passam por este secador não só apresentam dimensões muito reduzidas (inferiores a 4 mm) pois resultam

de dois processos de trituração, mas também possuem menos humidade intrínseca devido à ação dos secadores individuais, daí o tempo de permanência nos secadores das linhas ser reduzido [22][23].

À semelhança dos secadores presentes na linha, é necessário especificar certos aspetos relativos à estrutura deste novo secador.

A inclinação do tambor deste novo secador é uma alternativa à presença de saliências em todo o tambor pois também promove a movimentação da biomassa, apesar do fluxo de ar ter sentido contrário. Assim a resistência que o fluxo de ar quente confere à movimentação é amortizada sem perder o aumento na capacidade de secagem próprio desta configuração [22][23].

Em suma o tempo de permanência no secador por parte da matéria-prima é relativamente reduzido, o que não comprometeria o processamento da cota necessária enquanto que permitiria uma maior capacidade de secagem confiável. Porém, a instalação de um secador adicional, com capacidade para receber material das três linhas de secagem, implica definitivamente, a implementação de dispositivos auxiliares ao mesmo. A aquisição de uma nova fornalha que consiga satisfazer as necessidades deste novo secador bem como a implementação de um novo filtro de mangas e uma ligação à estação de limpeza ou até a construção de uma nova estação de limpeza tornam-se ações imprescindíveis à implantação de um regime de duas etapas de secagem. Desta forma, o custo de aquisição, de alterar a disposição dos elementos das linhas de forma a acomodar este novo módulo, de montagem e da manutenção preventiva poderiam exceder as mais valias provenientes deste novo módulo no que toca à celeridade da secagem e no volume de matéria processada acrescida [22].

Outro aspeto a melhorar é o transporte da biomassa entre os módulos de entrada e de secagem. Este é conseguido através do uso de uma máquina escavadora que abastece todas as linhas de secagem e que é responsável pelo abastecimento do crivo. Este veículo também partilha o seu espaço de circulação com os camiões basculantes que abastecem a fábrica com matéria-prima. O facto de só existir uma destas máquinas resulta em atrasos no abastecimento das linhas de secagem durante os meses de verão, em que a quantidade de matéria-prima a processar é elevada.

Já o facto de partilhar o espaço com os camiões basculantes também representa um risco de colisão, novamente, nos meses de maior produtividade dado que estes camiões estão em constante circulação.

Aumentar o número de operadores e máquinas escavadoras não constitui uma solução exequível uma vez que a sua adição resultaria na diminuição do espaço disponível para movimentação dos veículos envolvidos na produção. Uma possível solução seria limitar o uso da máquina escavadora para o abastecimento do crivo e utilizar um sistema de

transporte que permita a movimentação da biomassa desde o moinho 1 para os silos distribuidores do módulo de secagem sem interferir com a operação dos camiões basculantes. Este sistema seria composto por dois elementos, um transportador de correntes e pás de arrastamento, conhecido como um *Redler*, capaz de elevar a biomassa moída até uma altura de seis metros e um transportador de parafuso sem-fim, responsável por transportá-la até os silos distribuidores. Escolheu-se a altura de seis metros uma vez que a altura limite dos camiões basculantes, quando em trânsito, é cerca de cinco metros.

Implementação de um sistema de transporte de biomassa entre os módulos de entrada e de secagem.

Como já foi mencionado anteriormente, o ajuste dos parâmetros de produção é feito de forma manual por um dos chefes de turno. O sistema de monitorização presente alerta o colaborador quando um dos parâmetros, normalmente a temperatura de saída de uma das fornalhas ou de um dos secadores excede os valores recomendados. O tempo de aviso quando combinado com o tempo de resposta e as redundâncias presentes no ajuste da temperatura do módulo de secagem fazem com a resposta seja demorada e ineficiente.

Assim, propõem-se o desenvolvimento e consequente implementação de um sistema automático que realize os ajustes necessários.

Sistema de regulação dos parâmetros da produção.

As soluções anteriores, nomeadamente a recolha de informação sobre os parâmetros de produção de forma automática e a organização da mesma numa base de dados auxiliam o controlo do sistema através de um sistema de regulação.

Este permite a medição, em tempo real, do teor de humidade da biomassa ao longo do seu percurso na linha de secagem bem como o seu tempo de permanência no secador e as temperaturas sentidas nos vários pontos da linha de secagem de forma automática. Contudo a implementação deste sistema está dependente da criação de um algoritmo baseado na informação recolhida pelos dispositivos de monitorização montados no sistema.

O sistema de regulação utilizará a informação recolhida para escolher quais os parâmetros a ajustar, isto é, irá procurar na base de dados qual a melhor combinação de parâmetros para otimizar a operação de secagem e diminuir o risco de incêndio.

A ação deste novo sistema elimina a necessidade constante de monitorização e alteração de variáveis de processo de forma manual.

Na tabela 7 está resumida a informação disposta neste subcapítulo. Nesta não só se apresentam resumidas as soluções propostas, mas também os problemas que estas visam eliminar.

Tabela 7: Tabela resumo das propostas apresentadas no subcapítulo 7.1.

Defeitos	Soluções propostas
Perda de biomassa na fase de repouso para os elementos	Construção de uma cobertura sobre o local de repouso da biomassa
Matéria-prima danificada por combustão durante a fase de repouso	Amplificação dos depósitos da biomassa em repouso Movimentação periódica da biomassa entre os diferentes depósitos
Atraso no abastecimento da matéria-prima ao módulo de secagem	Implementação de um sistema de transporte entre o moinho 1 e o módulo de secagem de forma automática e sem recorrer a uma máquina escavadora
Atraso na modificação dos parâmetros da secagem	Implementação de um sistema de ajuste de parâmetros de produção automático

8 Aplicação da metodologia proposta

As alterações propostas no capítulo anterior podem ser representadas num diagrama simbólico de uma linha de secagem (figura 8.1). Esta figura incorpora o último elemento do módulo de entrada, o moinho 1 e os restantes dois módulos.

Na figura 8.1 encontram-se assinalados com um asterisco todos os elementos extraordinários ao projeto como consequência da implementação das propostas apresentadas. O primeiro destes elementos é o silo que alimenta o moinho 1, mais especificamente a incorporação de um sistema de pesagem. O seu funcionamento envolve um conjunto de câmaras, designadas de *buffers* e um conjunto células de pesagem. Na figura 8.2 está representada uma possível configuração deste sistema. A biomassa é admitida no *buffer* intermédio e ao mesmo tempo dá-se a medição do seu peso.

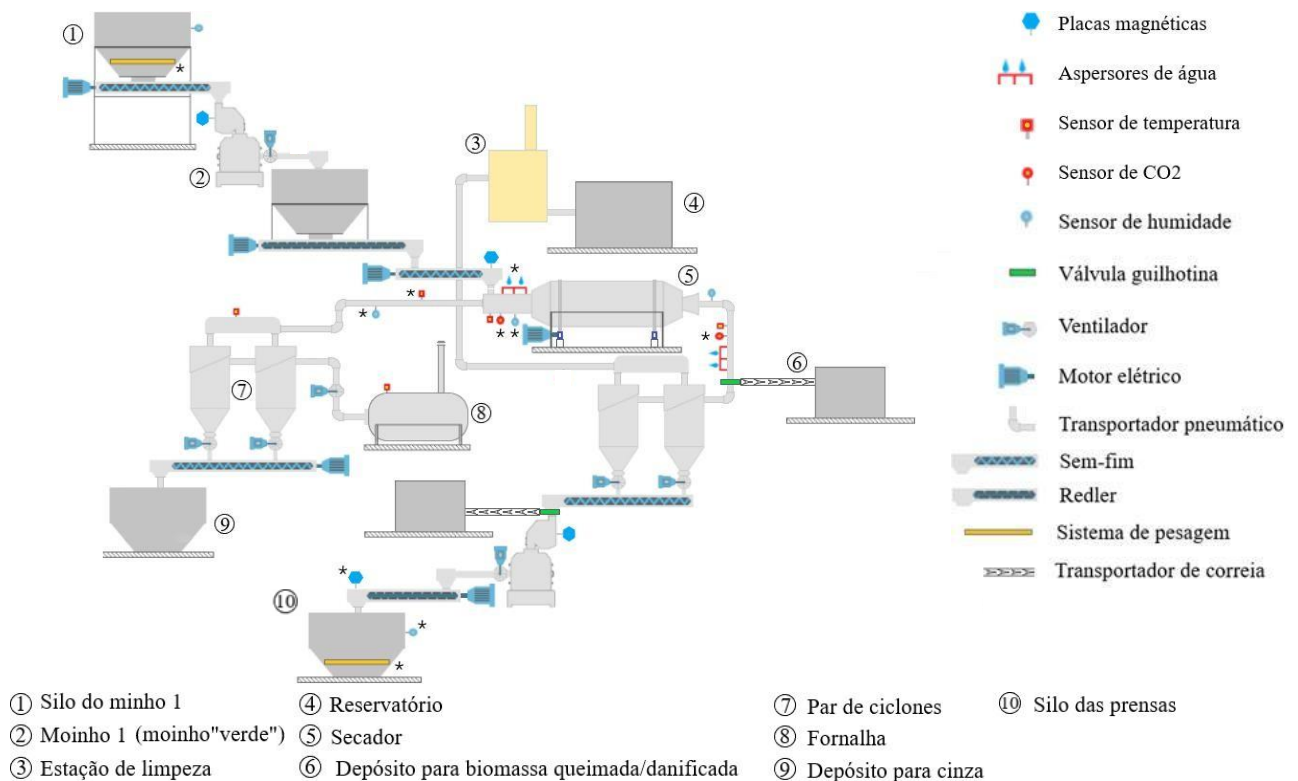


Figura 8.1: Configuração de uma linha de secagem segundo as sugestões apresentadas neste documento. O asterisco (*) representa a montagem de novos elementos.

Assim que é atingido o valor desejado, o sistema fecha a comporta, isolando o *buffer* intermédio. Imediatamente após o fecho da comporta superior, abre-se a comporta intermédia. A última comporta liberta a biomassa para um transportador, contudo, só é acionada alguns segundos após a comporta anterior para evitar a obstrução do transportador.

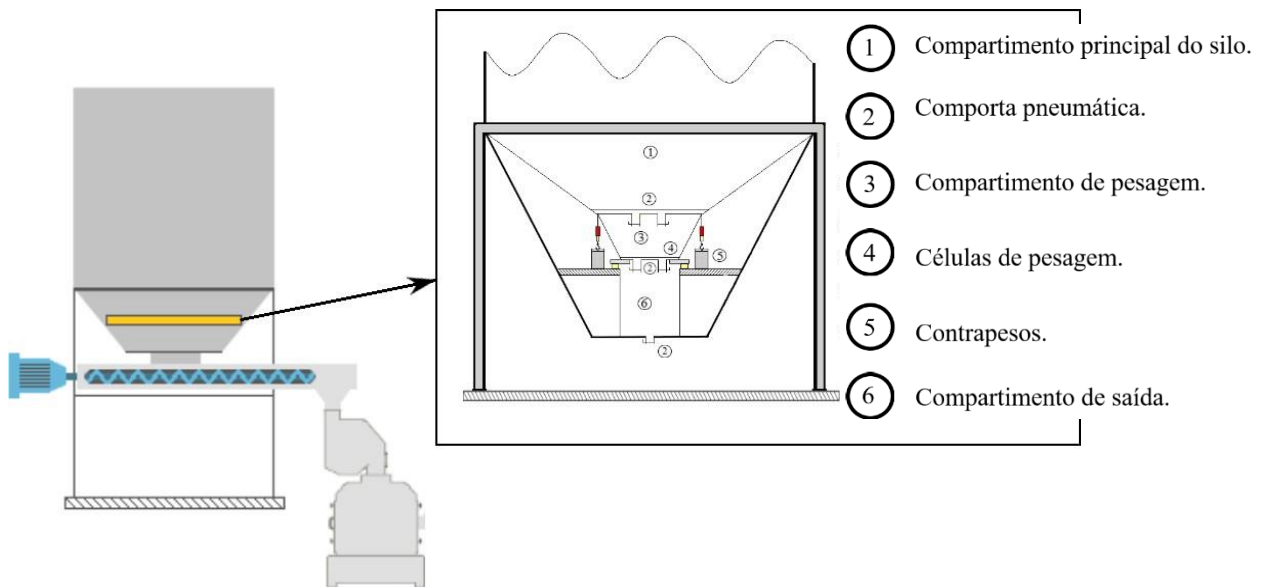


Figura 8.2: Diagrama do sistema de pesagem e dosagem a equipar em determinados silos das linhas de secagem, de acordo com o esquema da figura 8.1.

Este sistema, não só permite a pesagem da biomassa, mas também permite a dosagem exata da mesma. Trata-se de uma ferramenta útil, quando se trata de otimizar a produção pois permite um controlo maior sobre os parâmetros de produção.

Outra alteração à linha é a adição de dispositivos de monitorização adicionais. Começando com a incorporação de sensores de humidade adicionais antes do secador. Os valores recolhidos através destes sensores adicionais podem assim ser comparados àqueles lidos pelo sensor de humidade posicionado à saída do secador. Esta alteração confere ao sistema um maior nível de controlo sobre a influência da secagem sobre a matéria-prima.

Com o intuito de auxiliar a deteção e extinção de incêndios sugeriu-se a instalação de sensores de CO_2 , montados a jusante e a montante do secador, bem como a montagem de um sistema de aspersores adicionais à entrada do secador.

Uma vez expostas as adições às linhas de secagem, apresenta-se então um possível layout da fábrica na figura 8.3. A figura ilustra as alterações propostas no capítulo 7, principalmente as que foram apresentadas no subcapítulo 7.1.

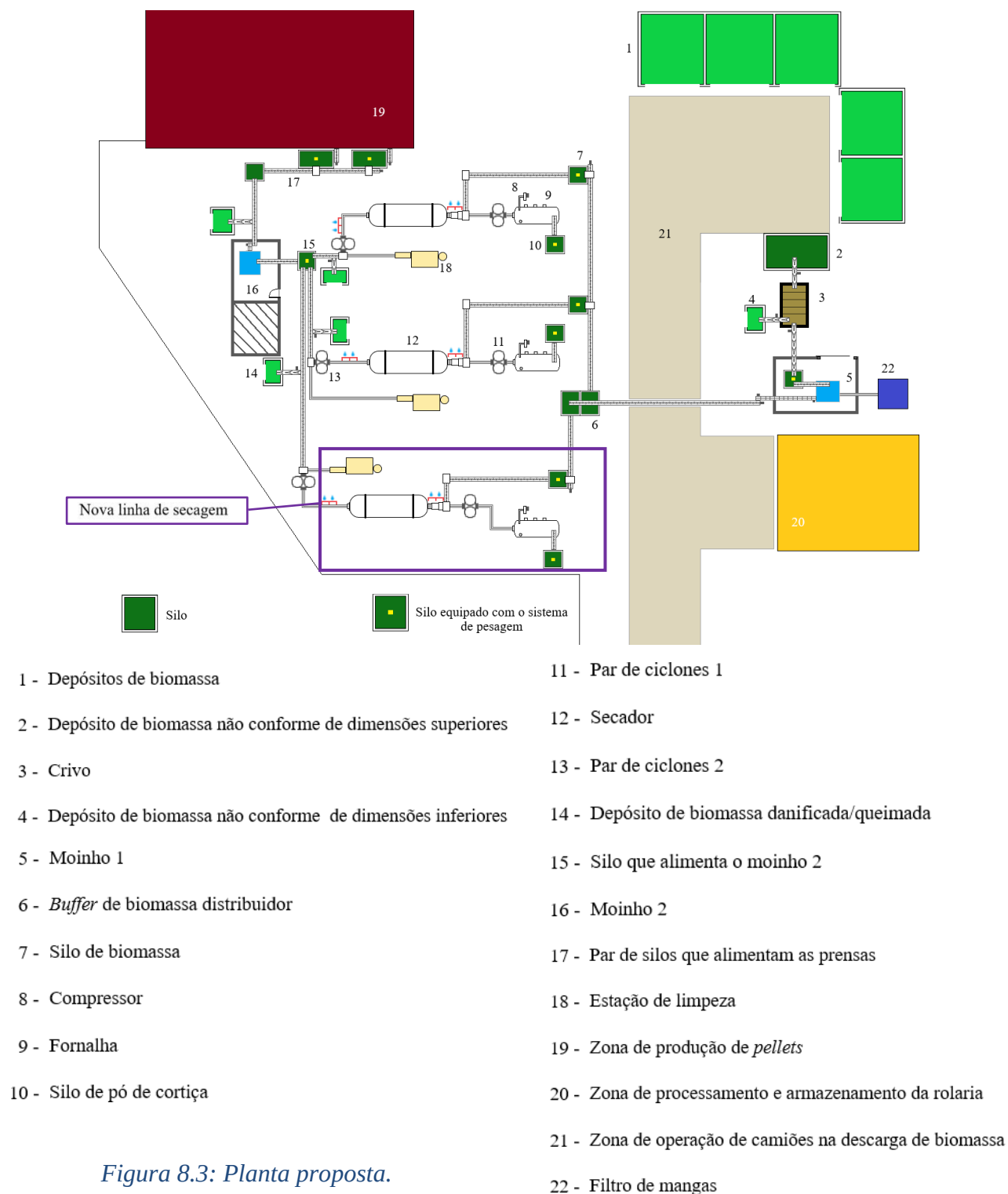


Figura 8.3: Planta proposta.

Este *layout* destaca-se do original na medida em que elimina o uso de uma máquina escavadora no transporte da matéria-prima, desde o moinho até o módulo de secagem. Evitando quaisquer atrasos e eliminando o risco de colisão com os veículos responsáveis pelo transporte da biomassa até os recintos, agora cobertos, da fábrica.

Para efetuar o transporte desde o módulo de entrada e o módulo de secagem é então utilizado um conjunto de transportadores, nomeadamente um transportador de parafuso sem-fim e um transportador de corrente e pás (*Redler*). A implementação deste permite a operação de camiões basculantes sem interferir com o transporte da biomassa moída (figura 8.4). Os silos distribuidores irão, por sua vez, redirecionar o seu conteúdo pelas três linhas de secagem, através um par de transportadores de parafuso sem-fim.

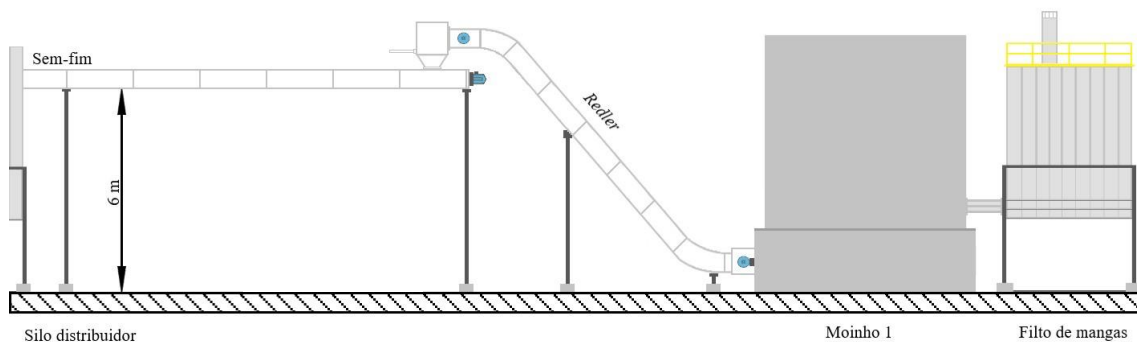


Figura 8.4: Equipamento proposto para o transporte da biomassa desde o módulo de entrada até o módulo de secagem.

Este plano visa também a reorganização dos elementos das linha de secagem, de modo a espaçá-los corretamente e aproveitar todo o espaço disponível no recinto da fábrica. A nova linha é aquela que melhor representa esta ideia, sendo posicionada a uma distância maior das restantes linhas bem como de qualquer outro elemento da fábrica, encontrando-se representada na parte inferior da figura 8.3.

9 Conclusões e trabalhos futuros

Apesar da expansão do mercado de pellets a nível europeu e mais precisamente em Portugal, foram poucas as alterações feitas ao processo em si, optando-se apenas pelo aumento da capacidade de produção, em detrimento de outros aspetos da produção. Como tal, a indiferença pela otimização do processo de produção de *pellets* acompanha a indústria em Portugal e por sua vez, reflete-se na falta de documentação dos parâmetros, na falta de formação dos colaboradores, na falta de investimento na melhoria das técnicas empregues, na hesitação em procurar melhorar o equipamento e por fim na carência de aspetos cruciais à manutenção do equipamento utilizado.

Assim, este trabalho teve como objetivo a combater esta tendência e introduzir novas práticas que auxiliem a elaboração de novos projetos bem como a revisão e melhoria de projetos existentes nesta indústria, mais precisamente, desde a recolha até a secagem da biomassa, uma vez que esta é diretamente responsável por muitas das características do produto final.

Para este efeito procedeu-se ao estudo do processo de secagem da biomassa utilizada na produção de *pellets*. Foram estudados os obstáculos à eficiência do processamento da matéria-prima e as suas causas. Inicialmente, de uma forma geral, analisando as várias etapas, a matéria-prima recolhida e o equipamento utilizado. Posteriormente procedeu-se à análise detalhada da preparação da biomassa para identificar quais as funções necessárias a cada etapa da secagem e como é que a empresa consegue satisfazer.

Em seguida procedeu-se à análise criteriosa de uma linha de secagem, recorrendo a duas ferramentas, a Teoria Axiomática de Projeto e o *Design for Maintainability*. Foram identificadas as falhas no sistema projetado, nomeadamente na relação entre os dispositivos responsáveis pela secagem. Já o DfM permitiu identificar as restantes causas dos problemas na linha de secagem, mais precisamente aqueles que advêm da falta de um plano de manutenção preventiva.

De acordo com a metodologia apresentada no capítulo cinco, elaborou-se um conjunto de soluções para eliminar, se possível, as dependências indesejadas no projeto. Adicionalmente foram apresentadas sugestões de modo a complementar o regime de manutenção corrente e soluções para facilitar e acelerar novas operações de manutenção, tanto preventivas como corretivas.

De seguida foram feitas propostas para garantir um melhor controlo sobre a produção e ainda uma sugestão de um processo adicional para auxiliar a secagem de grandes volumes de matéria-prima. Foram assim atingidos os objetivos estabelecidos no

início desta dissertação uma vez que foram abordadas todas as cinco etapas da metodologia proposta.

Utilizando os conceitos da Teoria Axiomática para garantir a independência entre os vários DPs e FRs permitiu melhorar o projeto inicial da linha de secagem. Porém a alteração do projeto nem sempre foi simples uma vez que as dependências de um dispositivo poderão também influenciar sistemas que seriam idealmente independentes entre si, originando sistemas redundantes.

Em relação ao DfM, esta teoria revelou ser uma mais valia, mais especificamente quando conjugada com a Teoria Axiomática de Projeto. A sua aplicação nas fases iniciais do projeto permitiu que qualquer decisão tivesse sempre em consideração não só o funcionamento das várias máquinas, mas também os modos de falha, possibilitando a melhoria nas operações de intervenção nas mesmas.

Assim como temas a desenvolver com interesse para o aumento da produtividade da linha de secagem em causa:

- Estudo da influência que o uso de serrim sobre a secagem da biomassa, nomeadamente o rendimento térmico deste quando comparado ao pó de cortiça, produzido e utilizado pela Regina Cork e as consequências da combustão aquando a eliminação dos subprodutos da sua combustão nocivos à produção.
- Implementação de novos processos e dispositivos na secagem da matéria-prima, nomeadamente a divisão da secagem em duas etapas distintas, conseguidas através da montagem de um secador adicional na linha.
- Estudo da influência do tipo de secador e método de secagem na redução do teor de humidade do material e no tempo de secagem do mesmo. Também seria interessante efetuar um estudo comparativo entre diferentes configurações da linha de secagem e a eficiência destes em processar matéria-prima nas diferentes estações do ano.

Em suma, esta dissertação, em conjunto com as visitas à Regina Cork realizado permitiu a compreensão e a avaliação da indústria de *pellets* bem como os métodos empregues na preparação da matéria-prima. O conhecimento adquirido tornou-se essencial na obtenção das soluções propostas, concernente a alterações propostas à maquinaria e em relação ao layout da fábrica. À luz do que foi abordado, considera-se que este texto pode servir como base de referência para a escolha de equipamento e para a montagem e manutenção do mesmo caso se pretendam implementar novas unidades de secagem.

Bibliografia

[1] Irene Montero, Francisco S. Justo, Sergio Nogales (2015), A Review of Pellets from Different Sources, *Materials*.

DOI: 10.3390/ma8041413

[2] Eliseu Monteiro, V. Mantha, A. Rouboa (2012), Portuguese pellets market: Analysis of the production and utilization constraints, *Energy Policy*.

DOI: 10.1016/j.enpol.2011.11.056

[3] Sudhagar Mani, Anthony Turhollow (2006), *Economics of producing fuel pellets from biomass*.

DOI: 10.13031/2013.20447

[4] ANPEB. (2015). Manual ENplus - Sistema de Certificação de Qualidade para Pellets de Madeira. Bruxelas: European Pellet Council:

<https://pelletenplus.es/pt/component/attachments/?task=download&id=217>, consultado a 12/2/24

[5] ANPEB Normalização vs Certificação de qualidade:

<https://enplus-pellets.eu/technical-documentation/>, consultado a 12/2/24

[6] Suh, N. P. (2001). *Axiomatic Design Advances and Applications*. Oxford University Press

[7] Suh, N. P. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press.

[8] G. J. Park (2007). *Analytic Methods for Design Practice*. Springer

[9] Mats Nordlund, Sang-Gook K, Taesik Lee. (2016). *Axiomatic Design: Making the Abstract Concrete*, Procedia CIRP 50:216-221.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.146>

[10] George Draghici, Eugen Pamintas, Banciu F. Veronica. (2010). COMPARATIVE STUDY BETWEEN AXIOMATIC AND SYSTEMATIC DESIGN MODELS, conference: *ModTech International Conference - New face of TMCR*, at: Slanic Moldova, volume: Modern Technologies, Quality and Innovation:

https://www.researchgate.net/publication/253341426_COMPARATIVE_STUDY_BETWEEN_AXIOMATIC_AND_SYSTEMATIC_DESIGN_MODELS

[11] Louis J. Gullo, Jack Dixon. (2021). *Design for Maintainability*. John Wiley & Sons, Inc.

[12] B.S Dhillon. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

[13] US Department of Defense (1996). *Maintainability Prediction, MIL-HDBK-472*. Washington, DC: US Department of Defense.

[14] T. Zeundjua, G. Thompson (2004). Review of maintainability design principles and their application to conceptual design, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*.

DOI: [10.1243/095440804774134280](https://doi.org/10.1243/095440804774134280)

John R. Meier, Jeffrey Russell. (2000). Model Process for Implementing Maintainability, *Journal of Construction Engineering and Management* 126(6).

DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:6(440).

[15] A. Osato, Shamsuddin Sulaiman, Muhamad A. Mansor (2012). Knowledge Management for Maintenance Activities in the Manufacturing Sector, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 5(1):612-621.

DOI: 10.15282/ijame.5.2012.7.0048.

[16] Diagrama de um filtro de mangas:

https://www.researchgate.net/publication/346985473_Reduc%CC%83o_dos_custos_na_gera%CC%83o_de_ar_comprimido_em_instala%CC%83es_industriais, consultado a 27/5/24

[17] Ottevanger Milling Engineers, modelo genérico de um moinho de martelos, de:

<https://www.ottvanger.com/products/grinding/hammer-mills-650/>, consultado a 23/5/24

[18] RESTA, válvula guilhotina pneumática, de:

<https://www.restavalve.com/slurry-knife-gate-valve/>, consultado a 24/5/24

[19] António M. Coelho, Gabriela N., Miguel Calvique, António Morão (2012), Tackling with Redundant Design Solutions Through Axiomatic Design, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13(10).

DOI: 10.1007/s12541-012-0241-x.

[20] TCPEL, Inspeção e instalação de um secador de tambor rotativo, de:

<https://www.tcpel.com/pt/prepara%C3%A7%C3%B5es-de-instala%C3%A7%C3%A3o-do-secador-rotativo-e-mal-entendido/>, consultado a 18/6/24

[21] Stefan Freodeson, Jonas Berghel, Roger Renstrom (2012), The Potential of Using Two-Step Drying Techniques for Improving Energy Efficiency and Increasing Drying Capacity in Fuel Pellet Industries, *Drying Technology Vol. 31, 2013*.

DOI: [10.1080/07373937.2013.833520](https://doi.org/10.1080/07373937.2013.833520).

[22] Romuald Żyłka (2014), *Handbook of Industrial Drying*, Taylor & Francis Group, LLC.

DOI: 10.1201/b17208-59.

[23] Google Maps, Google LLC

[24] Leonel Nunes, Margarida Casau, Marta Dias, Portuguese Wood Pellets Market: Organization, Production and Consumption Analysis (2021), *Resources* 2021, 10(12), 130. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources10120130>

Teoria Axiomática de Projeto

Corolários

Corollary 1 (Decoupling of coupled designs)	Decouple or separate parts or aspects of a solution if FRs are coupled or become interdependent in the designs proposed.
Corollary 2 (Minimization of FRs)	Minimize the number of FRs and constraints.
Corollary 3 (Integration of physical parts)	Integrate design features into a single physical part if the FRs can be independently satisfied in the proposed solution.
Corollary 4 (Use of standardization)	Use standardized or interchangeable parts if the use of these parts is consistent with FRs and constraints.
Corollary 5 (Use of symmetry)	Use symmetrical shapes and/or components if they are consistent with the FRs and constraints.
Corollary 6 (Largest design ranges)	Specify the largest allowable design range in stating FRs.
Corollary 7 (Uncoupled design with less information)	Seek an uncoupled design that requires less information than coupled designs in satisfying a set of FRs.
Corollary 8 (Effective reangularity of a scalar)	The effective reangularity R for a scalar coupling “matrix” or element is unity.

Teoremas

Theorem 1 (Coupling due to insufficient number of DPs.)	When the number of DPs is less than the number of FRs, either a coupled design results or the FRs cannot be satisfied.
Theorem 2 (Decoupling of coupled design)	When a design is coupled because of a larger number of FRs than DPs (i.e., $m > n$), it may be decoupled by the addition of new DPs so as to make the number of FRs and DPs equal to each other if a subset of the design matrix containing $n \times n$ elements constitutes a triangular matrix.
Theorem 3 (Redundant design)	When there are more DPs than FRs, the design is a redundant design, which can be reduced to an un- coupled design or a decoupled design, or a coupled design.
Theorem 4 (Ideal design)	In an ideal design, the number of DPs is equal to the number of FRs and the FRs are always maintained independent of each other.
Theorem 5 (Need for new design)	When a given set of FRs is changed by the addition of a new Fr, by substitution of one of the FRs with a new one, or by selection of a completely different set of FRs, the design solution given by the original DPs cannot satisfy the new set of FRs. Consequently, a new design solution must be sought.
Theorem 6 (Path independence of uncoupled design)	The information content of an uncoupled design is independent of the sequence by which the DPs are changed to satisfy the given set of FRs.

Theorem 7 (Path dependency of coupled and decoupled design)	The information contents of coupled and decoupled designs depend on the sequence by which the DPs are changed to satisfy the given set of FRs.
Theorem 8 (Independence and design range)	A design is an uncoupled design when the designer-specified range is greater than $(\sum \partial FR_i / \partial DP_j \Delta DP_j)_{i \neq j} = 1$ in which case the nondiagonal elements of the design matrix can be neglected from design consideration.
Theorem 9 (Design for manufacturability)	For a product to be manufacturable with reliability and robustness, the design matrix for the product, [A] (which relates the FR vector for the product to the DP vector of the product), times the design matrix for the manufacturing process, [B] (which relates the DP vector to the PV vector of the manufacturing process), must yield either a diagonal or a triangular matrix. Consequently, when either [A] or [B] represents a coupled design, the independence of FRs and robust design cannot be achieved. When they are full triangular matrices, either both of them must be upper triangular or both lower triangular for the manufacturing process to satisfy independence of functional
Theorem 10 (Modularity of independence measures)	Suppose that a design matrix [DM] can be portioned into square submatrices that are nonzero only along the diagonal. Then the reangularity and semangularity for [DM] are equal to the product of their corresponding measures for each of the non- zero submatrices. [Note: See Suh (1990).]

Theorem 11 (Invariance)	Reangularity and semangularity for a design matrix [DM] are invariant under alternative orderings of the FR and DP variables, as long as the orderings preserve the association of each FR with its corresponding DP.
Theorem 12 (Sum of information)	The sum of information for a set of events is also information, provided that proper conditional probabilities are used when the events are not statistically independent.
Theorem 13 (Information content of the total system)	If each DP is probabilistically independent of other DPs, the information content of the total system is the sum of the information of all individual events associated with the set of FRs that must be satisfied.
Theorem 14 (Information content of coupled versus uncoupled designs)	When FRs are changed from one state to another in the functional domain, the information required for the change is greater than for a coupled design than for an uncoupled design.
Theorem 15 (design manufacturing interface)	When the system compromises the independence of the FRs of the product, either the design of the product must be modified or a new manufacturing process must be designed and/or used to maintain the independence of the FRs of the products.
Theorem 16 (Equality of information content)	All information contents that are relevant to the design task are equally important regardless of their physical origin, and no weighting factor should be applied to them.
Theorem 17 (Design in the absence of complete information)	Design can proceed even in the absence of complete information only in the case of a decoupled design if the missing information is related to the off-diagonal elements.

Theorem 18 (Existence of an uncoupled or de- coupled deign)	There always exists an uncoupled or a decoupled design that has less information than a coupled de- sign.
Theorem 19 (Robustness of design)	An uncoupled design and a decoupled design are more robust than a coupled design in the sense that is easier to reduce the information content of de- signs than to satisfy the independence axiom.
Theorem 20 (Design range and coupling)	If the design ranges of uncoupled or decoupled de- signs are tightened, they may become coupled de- signs. Conversely, if the design ranges of some coupled designs are relaxed, the designs may be- come either uncoupled or decoupled.
Theorem 21 (Robust design when the design range has a nonuniform pdf)	If the probability distribution function (pdf) of the FR in the design range is nonuniform, the probability of success is equal to 1 when the system range is inside the design range.
Theorem 22 (Comparative robustness of a decoupled design)	Given the maximum design ranges for a given set of FRs, decoupled designs cannot be as robust as uncoupled designs in that the allowable tolerances for the DPs of decoupled design are less than those of an uncoupled design.
Theorem 23 (Decreasing robustness of a decoupled design)	The allowable tolerance and the robustness of a decoupled design with a full triangular matrix diminish with an increase in the number of functional requirements.
Theorem 24 (Optimum scheduling)	Before a schedule for a robot motion or factory scheduling can be optimized, the design of the tasks must be made to satisfy the independence axiom by adding decouplers to eliminate coupling. The decouplers may be in the form of a queue or separate hardware or buffer.

Theorem 25 (“Push” system versus “pull” system)	When identical parts are processed through a system, a “push” system can be designed with the use of decouplers to maximize productivity, whereas when irregular parts requiring different operations are processed, a “pull” system is the most effective system.
Theorem 26 (Conversion of a system with infinite time-dependent combinatorial complexity to a system with periodic complexity)	Uncertainty associated with a design (or a system) can be reduced significantly by changing the design from one serial combinatorial complexity to one of periodic complexity.

in Suh, N.P. (2005): "*Complexity: Theory and Applications*", Oxford University Press, N.Y. p 23;44-49.

Theorem 25 (“Push” system versus “pull” system)	When identical parts are processed through a system, a “push” system can be designed with the use of decouplers to maximize productivity, whereas when irregular parts requiring different operations are processed, a “pull” system is the most effective system.
Theorem 26 (Conversion of a system with infinite time-dependent combinatorial complexity to a system with periodic complexity)	Uncertainty associated with a design (or a system) can be reduced significantly by changing the design from one serial combinatorial complexity to one of periodic complexity.