



Fábio Alexandre Cartaxo Rodrigues

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Aplicação da Teoria Axiomática de Projeto para
análise da conceção e funcionamento de uma linha de
produção de *pellets* de madeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva

Arguente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Vogal: Prof. Doutor João Manuel Vicente Fradinho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2019

Aplicação da Teoria Axiomática de Projeto para análise da conceção e funcionamento de uma linha de produção de *pellets* de madeira

Copyright © Fábio Alexandre Cartaxo Rodrigues, 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.

Aos meus pais, Carlos e Elisabete Rodrigues

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Fradinho, por toda a ajuda prestada e trabalho feito comigo para a conclusão desta tese. O interesse e disponibilidade do professor foram determinantes não só na conclusão da dissertação, mas também no desenvolvimento do meu primeiro artigo científico publicado. Sou muito grato pela oportunidade de trabalhar com o professor, e agradeço todo o conhecimento e conselhos transmitidos.

Agradeço também a todos os colaboradores da ReginaCork, empresa na qual estagiei 6 meses para reunir informação vital para esta tese. Em especial ao Sr. Carlos Garcia, por me ter acolhido na sua empresa e se ter mostrado completamente disponível para me ajudar em qualquer assunto, e ao Eng. Rogério Esteves, por toda a ajuda e conhecimento transmitido, sem o qual esta tese não poderia ser feita.

Quero deixar ainda um agradecimento muito especial a toda a minha família, que sempre me apoiou e se interessou no meu percurso académico. Em especial quero deixar uma palavra de apressa à minha mãe, Elisabete Rodrigues, que foi e sempre será um alicerce fundamental da minha formação, tanto académica como pessoal.

À minha namorada, Inês Mouraia, quero agradecer por todo o amor, apoio e paciência. A sua presença ao meu lado ao longo dos anos foi fundamental para a conclusão do meu percurso académico.

À minha “segunda” família, Francisco, Clarinda, Raquel e Bruno Almeida, que me acolheram em sua casa durante toda a minha vida, e durante todos os almoços durante o meu estágio, e me ajudaram de uma forma que nunca poderei retribuir. Quero deixar um agradecimento especial ao meu amigo e irmão Bruno Almeida, pela sua amizade e por todo apoio nos melhores e nos piores momentos ao longo de toda a minha vida.

A todos os meus amigos e colegas, da faculdade ou de infância, por todas os longos dias e noites de trabalho ou camaradagem, o seu apoio e amizade tem uma importância inestimável.

Por último quero agradecer à grande instituição que é a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, e a todos os professores e auxiliares que me ensinaram e ajudaram durante todo o meu percurso.

Resumo

Ao longo dos anos, as indústrias têm desenvolvido e adaptado processos produtivos para servirem o seu propósito. Esta adaptação é feita essencialmente com base em conhecimento empírico adquirido ao longo dos anos. Porém, este tipo de projeto (baseado em dados empíricos apenas), pode levar a linhas de produção com necessidade de melhorias, principalmente quando se trata de indústrias com muitos anos de existência.

Nesta tese será feita a análise da conceção e do funcionamento de uma linha de produção de *pellets* de madeira. A indústria do tratamento de madeira e cortiça em Portugal é explorada há muito tempo e em alguns casos permaneceu estagnada, apresentando alguma resistência à mudança. Na sequência de uma análise independente (não previamente influenciada) e com os conhecimentos adquiridos em todo o curso e particularmente na disciplina de Teoria e Metodologias de Projeto, pretendeu-se neste trabalho identificar oportunidades de melhoria na linha de produção.

A análise da linha foi feita usando a Teoria Axiomática de Projeto. Esta análise teve como principal objetivo a identificação de pontos de melhoria no processo produtivo. Foi feita a decomposição da linha até quatro níveis de profundidade sendo sempre apresentada e interpretada a equação de projeto de cada subprocesso considerado.

Verificou-se a existência de bastantes sistemas em que a independência entre requisitos está presente. Foram identificados cinco subprocessos que infringiam o Axioma da Independência. Em todos esses casos foram propostas soluções alternativas com possibilidade de os “Requisitos Funcionais” serem ajustados de uma forma independente.

Palavras-chave: Linhas de Produção, *Pellets*, Teoria Axiomática de Projeto, Teorias e Metodologias de Projeto

Abstract

Over the years, industries have been developing and adapting production processes to serve their purpose. This adaptation is essentially based on empirical knowledge acquired over the years. However, this type of project (based on empirical data only) can lead to production lines in need of improvement, especially when it comes to industries with many years of existence.

This thesis will analyse the design and operation of a wood pellet production line. The wood and cork processing industry in Portugal has been exploited for a long time and in some cases remained stagnant, showing some resistance to change. Following an independent analysis (not previously influenced) and with the knowledge acquired throughout the course and particularly in the discipline of Design Theories and Methodologies, this work aims at identifying opportunities for improvement in the production line.

The line analysis was done using the Axiomatic Design Theory. The main objective of this analysis was to identify points of improvement in the production process. The line was decomposed to four levels of depth and the design equation of each subprocess considered was always presented and interpreted.

There have been several systems where independence between requirements is present. Five sub-processes that infringed the Independence Axiom were identified. In all these cases alternative solutions have been proposed with the possibility that the functional requirements can be independently adjusted.

Keywords: Production Lines, Pellets, Axiomatic Design Theory, Design Theories and Methodologies

Índice

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	10
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	10
2	TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJETO	13
2.1	TEORIA AXIOMÁTICA – O QUE É?	13
2.2	DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS	14
2.2.1	Domínio do Cliente	14
2.2.2	Domínio Funcional	14
2.2.3	Domínio Físico	15
2.2.4	Domínio do Processo	16
2.3	AXIOMA DE INDEPENDÊNCIA	16
2.3.1	Projeto Acoplado	17
2.3.2	Projeto desacoplável	17
2.3.3	Projeto desacoplado	18
2.4	APLICAÇÃO AO CASO EM ESTUDO	18
3	A EMPRESA E O PRODUTO	19
3.1	A EMPRESA	19
3.2	O PRODUTO – <i>PELLETS</i>	20
3.2.1	Uso doméstico	21
3.2.2	Uso industrial	22
4	O PROCESSO – PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i>	23
4.1	VISTA PORMENORIZADA DAS TECNOLOGIAS E PROCESSOS DE PELETIZAÇÃO	26
4.1.1	Pré-processamento	26
4.1.2	Peletização	31
4.1.3	Pós-processamento	32
4.1.4	Sistemas complementares	33
4.1.5	Testes e verificações	34
4.2	CONSIDERAÇÕES GERAIS	34
5	ANÁLISE AXIOMÁTICA À LINHA DE PRODUÇÃO	37
5.1	NÍVEL 1	37
5.2	NÍVEL 2	40
5.2.1	DP ₁ – Sistema de preparação da matéria-prima	40
5.2.2	DP ₂ – Prensa peletizadora	42
5.2.3	DP ₃ – Sistema de pós-produção	46
5.2.4	DP ₄ – Sistema de distribuição	47
5.2.5	DP ₅ – Sistema de filtragem e reaproveitamento	50
5.2.6	DP ₆ – Sistema de detecção e extinção de incêndios	52

5.2.7	Análise de nível	54
5.3	NÍVEL 3.....	57
5.3.1	DP _{1,1} – Crivo rotativo	57
5.3.2	DP _{1,2} – Moinho de martelos (verdes).....	61
5.3.3	DP _{1,3} - Secador de tambor rotativo	66
5.3.4	DP _{3,1} – Arrefecedor.....	69
5.3.5	DP _{3,2} – Crivo vibratório	72
5.3.6	DP _{3,3} – Sistema de ensacamento.....	74
5.3.7	DP _{4,1} – Silo de estilha	75
5.3.8	DP _{4,2} – Transportador de correia.	78
5.3.9	DP _{4,6} – Transportador de parafuso sem-fim	81
5.3.12	DP _{5,1} – Sistema de filtragem de ar (moinhos).....	84
5.3.13	DP _{5,2} – Estação de limpeza e filtragem de gases	88
5.3.14	DP _{6,3} – Sistema de remoção de material	90
5.3.15	Análise de nível	92
5.4	NÍVEL 4.....	100
5.4.1	DP _{1,3,2} – Fornalha.....	100
5.4.2	DP _{1,3,4} – Estrutura do secador	104
5.4.3	DP _{3,3,1} – Mecanismo de ensacamento em Big Bags	108
5.4.4	DP _{3,3,2} – Mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg.....	110
5.4.5	DP _{4,1,1} – Estrutura do silo (estilha)	112
5.4.6	DP _{4,3,1} – Estrutura do silo (silo 1, silo 2, silo 3).....	114
5.4.7	DP _{5,2,3} – Estação de lavagem de gases.....	116
5.4.8	Análise de nível	120
6	OPORTUNIDADES DE MELHORIA	129
6.1	ROLAMENTOS	129
6.2	PRESA PELETIZADORA.....	133
6.3	SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO.....	139
6.4	MECANISMO DE ENSACAMENTO EM <i>BIG BAGS</i>	141
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	143
	BIBLIOGRAFIA.....	149
	ANEXO A	153
	ANEXO B1.....	156
	ANEXO B2.....	157
	ANEXO B3.....	158
	ANEXO B4.....	159
	ANEXO B5.....	160
	ANEXO B6.....	160

Índice de figuras

FIGURA 2.1 - MAPEAMENTO DOS DOMÍNIOS DA AXIOMÁTICA.....	13
FIGURA 2.2 - EXEMPLO DE DEFINIÇÃO DE FR	14
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE DEFINIÇÃO DE DP	15
FIGURA 2.4 - EXEMPLO DO PROCEDIMENTO EM ZIGUEZAGUE	15
FIGURA 3.1 - VISTA AÉREA DA FÁBRICA POR ALTURA DA SUA ABERTURA (REGINACORK, 2019).....	19
FIGURA 3.2 - <i>PELLETS</i> DE MADEIRA (LIGNETICS, 2019)	20
FIGURA 3.3 – SALAMANDRA A <i>PELLETS</i> (LEROY MERLIN, 2019)	20
FIGURA 3.4 - FORNALHA A <i>PELLETS</i> (BIOENERGIA, 2019).....	20
FIGURA 4.1 -DIAGRAMA DE FLUXO.....	23
FIGURA 4.2 - FLUXOGRAMA	24
FIGURA 4.3 - PILHAS DE MATÉRIA-PRIMA	26
FIGURA 4.4 - EXEMPLO DE ERRO DE ARMAZENAMENTO	27
FIGURA 4.5 - SILO DE ESTILHA.....	28
FIGURA 4.6 – BASES MÓVEIS	28
FIGURA 4.7 – TRANSPORTADOR DE CORREIA.....	28
FIGURA 4.8 - CRIVO ROTATIVO.....	29
FIGURA 4.9 - TRANSPORTADOR DE CORREIA	29
FIGURA 4.10 – MAGNETO PERMANENTE	29
FIGURA 4.11 - MOINHO (MARTELO TRITURADOR) (AZEUS PELLET MILL, 2019).....	30
FIGURA 4.12 - INTERIOR DE UM SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO (SEASUN MACHINERY, 2019).....	31
FIGURA 4.13 - CAMARA DE PELETIZAÇÃO	32
FIGURA 4.14 - MATRIZ DE PELETIZAÇÃO	32
FIGURA 5.1 - SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO.....	41
FIGURA 5.2 - MOINHO	41
FIGURA 5.3 - PRENSA PELETIZADORA	43
FIGURA 5.4 - CÂMARA DE PELETIZAÇÃO	44
FIGURA 5.5 - MATRIZ DE PELETIZAÇÃO	44
FIGURA 5.6 - DISPERSÃO DOS <i>PELLETS</i> À SAÍDA DA PRENSA.....	46
FIGURA 5.7 - MECANISMO DE ENSACAMENTO	47
FIGURA 5.8 - ESTILHA.....	48
FIGURA 5.9 - SILO DE ESTILHA.....	50
FIGURA 5.10 - SILO DE <i>PELLETS</i>	50
FIGURA 5.11 - SISTEMA DE FILTRAGEM DE AR (MOINHOS).....	51
FIGURA 5.12 - ESTAÇÃO DE LIMPEZA DE GASES.....	52
FIGURA 5.13 - SENSOR DE FAÍSCAS.....	53
FIGURA 5.14 – TUBAGEM DE ÁGUA LIGADA AOS ASPERSORES.....	53
FIGURA 5.15 - DECOMPOSIÇÃO DOS FRS E DPS.....	57
FIGURA 5.16 - CRIVO ROTATIVO.....	58
FIGURA 5.17 - ESTILHA CRIVADA	58
FIGURA 5.18 - MATRIZ CILÍNDRICA (PRONAR RECYCLING, 2019)	59
FIGURA 5.19 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO CRIVO ROTATIVO (CFCAI, 2019).....	60
FIGURA 5.20 - MOINHO DE MARTELOS.....	62
FIGURA 5.21 - TRANSPORTADOR DE PARAFUSO SEM-FIM.....	63

FIGURA 5.22 - ESQUEMA DE UM MOINHO PARA MADEIRA	63
FIGURA 5.23 - FUNCIONAMENTO DE UM MOINHO DE MARTELOS (BULKINSIDE, 2019).....	64
FIGURA 5.24 - CÂMARA DE TRITURAÇÃO.....	65
FIGURA 5.25 - EXEMPLOS DE TELAS DE MOINHOS (911 METALLURGIST., 2019).....	65
FIGURA 5.26 - SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO.....	66
FIGURA 5.27 - ARREFECEDOR DE <i>PELLETS</i> (AZEUS, 2019).....	70
FIGURA 5.28 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM ARREFECEDOR DE <i>PELLETS</i> (AZEUS, 2019).....	71
FIGURA 5.29 - FUNCIONAMENTO DE UM CRIVO VIBRATÓRIO LINEAR (YINXING, 2019).....	73
FIGURA 5.30 - MECANISMO DE ENSACAMENTO EM <i>BIG BAGS</i>	75
FIGURA 5.31 - MECANISMO DE ENSACAMENTO EM SACOS DE 15 KG.....	75
FIGURA 5.32 - SILO DE ESTILHA.....	76
FIGURA 5.33 – CENTRAIS ENERGÉTICAS HIDRÁULICAS	76
FIGURA 5.34 - ATUADORES LINEARES DOS SILOS.....	77
FIGURA 5.35 - PLATAFORMA DE ALIMENTAÇÃO	77
FIGURA 5.36 - ZONA INFERIOR DO SILO DE <i>PELLETS</i>	78
FIGURA 5.37 - CORREIA TRANSPORTADORA	79
FIGURA 5.38 - TRANSPORTADOR INCLINADO	79
FIGURA 5.39 - ELEVADOR DE MATERIAL.....	80
FIGURA 5.40 - ROSCA HELICOIDAL (SEM EIXO) (COFELMA, 2019).....	81
FIGURA 5.41 - ROSCA HELICOIDAL (COM EIXO) (COBRIMETAL, 2019).....	81
FIGURA 5.42 – MOTOR NO TRANSPORTADOR.....	82
FIGURA 5.43 - ESTRUTURA EXTERIOR DO TRANSPORTADOR	82
FIGURA 5.44 - ESQUEMA DE UM TRANSPORTADOR DE PARAFUSO SEM-FIM (PALAMATIC PROCESS, 2019).....	83
FIGURA 5.45 - ESQUEMA DO TRANSPORTADOR INCLINADO (PALAMATIC PROCESS, 2019).....	83
FIGURA 5.46 - EXEMPLO DE ROSCA ALTERNATIVA	84
FIGURA 5.47 - SISTEMA DE FILTRAGEM DE AR	85
FIGURA 5.48 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM CICLONE (SOLERPALAU, 2019).....	85
FIGURA 5.49 - FILTRO DE MANGAS (SILOS CORDOBA, 2019).....	86
FIGURA 5.50 - SISTEMA DE CICLONES SEPARADORES.....	89
FIGURA 5.51 - TRANSPORTADOR DE PARAFUSO SEM-FIM DOS CICLONES SEPARADORES.....	89
FIGURA 5.52 - ESTAÇÃO DE LAVAGEM DE GASES.....	90
FIGURA 5.53 - VÁLVULA DE DESCARGA.....	91
FIGURA 5.54 - TRANSPORTADOR DE CORREIA.....	91
FIGURA 5.55 - BLOCO DE DESCARGA	92
FIGURA 5.56 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ESTILHA	101
FIGURA 5.57 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ DE CORTIÇA.....	101
FIGURA 5.58 - CONDUTAS DE ENTRADA DE AR	102
FIGURA 5.59 - CHAMINÉ DE ESCAPE.....	103
FIGURA 5.60 - SISTEMA DE CICLONES SEPARADORES.....	103
FIGURA 5.61 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR DE FLUXO CONCORRENTE [MAXTON ENGINEERING, 2019].....	105
FIGURA 5.62 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR DE FLUXO CONTRACORRENTE (MAXTON ENGINEERING, 2019).....	105
FIGURA 5.63 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM SECADOR DE 3 PASSAGENS (SINODER, 2019)	106
FIGURA 5.64 - ROSCA DE ENTRADA NO SECADOR (SEASUN MACHINERY, 2019)	107

FIGURA 5.65 - SISTEMA DE ENSACAMENTO (BIG BAGS)	109
FIGURA 5.66 - MECANISMO DE ENSACAMENTO (15 KG).....	112
FIGURA 5.67 - SILO DE ESTILHA.....	113
FIGURA 5.68 - SILO DE SERRIM	115
FIGURA 5.69 - ESTAÇÃO DE LIMPEZA DE GASES.....	117
FIGURA 5.70 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA LAVAGEM DE GASES	118
FIGURA 5.71 - CHAMINÉ DE ESCAPE DE VAPOR DE ÁGUA.....	119
FIGURA 6.1 - CHUMACEIRA COM ACUMULAÇÃO DE PÓ.....	129
FIGURA 6.2 - SOLUÇÃO FUNCIONAL PARA A ACUMULAÇÃO DE PÓ EM CHUMACEIRAS	131
FIGURA 6.3 - SOLUÇÃO FUNCIONAL 2.....	132
FIGURA 6.4 - RAMPA DE SAÍDA DA PRENSA PELETIZADORA	134
FIGURA 6.5 - SOLUÇÃO TEMPORÁRIA PARA DISPERSÃO DE <i>PELLETS</i> (PRENSA À ESQUERDA)	135
FIGURA 6.6 - EXEMPLO DE UMA PRENSA ABERTA (À ESQUERDA) E FECHADA (À DIREITA).....	136

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 - VALORES LIMITE PARA PARÂMETROS RELEVANTES DOS <i>PELLETS</i> (ENPLUS, 2015).....	21
TABELA 3.2 - TIPOS DE MADEIRA PERMITIDOS PARA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i> (ENPLUS, 2015).....	22
TABELA 5.1 - MATRIZ DE PROJETO	56
TABELA 5.2 - MATRIZ DE PROJETO - FR ₁	98
TABELA 5.3 - MATRIZ DE PROJETO - FR ₃	99
TABELA 6.1 - DECOMPOSIÇÃO DO FR ₂	133
TABELA 6.2 - DECOMPOSIÇÃO DO FR ₂ - MELHORADO	138
TABELA 6.3 - DECOMPOSIÇÃO DO FR _{1,3}	139
TABELA 6.4 - DECOMPOSIÇÃO DO FR _{3,3,1}	141

1 Introdução

A conceção e funcionamento de uma linha de produção de qualquer tipo é uma área muito rica no domínio da engenharia. A indústria procura sempre mecanismos e métodos que possam melhorar a eficiência e a produtividade dos processos que levam à produção de determinado produto. Porém, por ser uma área muito prática, por vezes o conhecimento é, na sua maioria, empírico, sendo as decisões tomadas na fase de projeto desprovidas de qualquer fundamentação teórica.

Tendo isto em conta, é de grande interesse para a engenharia analisar ao pormenor projetos feitos sem algum tipo de base teórica para perceber mais profundamente o seu funcionamento, bem como disseminar o conhecimento da área estudada em concreto.

O crescimento do mercado dos *pellets* tem evoluído em grande escala, tendo a produção de *pellets* aumentado de 400 000 para 1 200 000 toneladas por ano, entre 2008 e 2014. Estes valores apresentam um crescimento de 200 % em 6 anos, sendo que a maioria da produção é ainda destinada à exportação. Por ser uma área em crescimento, o seu funcionamento ainda depende muito de conhecimento empírico obtido em outras indústrias de características similares (tais como a indústria da madeira e da cortiça). Isto leva ao caso discutido anteriormente, um projeto em que as decisões tomadas são desprovidas de fundamentação teórica.

Pode-se concluir-se então que o processo de produção de pellets carece de uma abordagem teórica para que todas as fases de produção possam não só ser compreendidas mais profundamente, como também melhoradas.

Para proceder à análise decidiu-se utilizar uma nova teoria de projeto aplicável quer a novos projetos, quer à melhoria de projetos existentes: a Teoria Axiomática de Projeto. Com o auxílio do conhecimento e dos axiomas contidos nesta teoria poderá ser feita uma análise profunda e muito rica do ponto de vista da engenharia. A análise focar-se-á principalmente na relação entre os domínios físico e funcional, tendo em consideração o axioma da independência (conceitos que irão ser abordados durante a tese).

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta tese será fazer a análise e identificação de possíveis melhorias de uma linha de produção de *pellets* existente, tendo a Teoria Axiomática de Projeto como principal bússola de trabalho, nomeadamente o Axioma da Independência. De forma paralela a tese deverá servir como guia para perceber bem o processo de produção dos *pellets* e contemplar as considerações que devem ser tidas em conta no projeto de novas linhas e na manutenção das mesmas.

A tese foi elaborada em regime de estágio, pelo que muito do conhecimento aqui apresentados tem origem na experiência dos engenheiros e operadores da fábrica. Por isso o trabalho desenvolvido não teve apenas como objetivo a análise do processo, mas também foram consideradas formas de melhorar a produtividade do mesmo e desta forma auxiliar a empresa.

Por último, e por força das condições de estágio que foram disponibilizadas na empresa, esta tese procura disponibilizar uma vista sobre o projeto real de uma linha de produção, já que ao longo do estágio feito, foi possível participar no projeto de uma extensão da linha de produção, podendo assim ser documentado cada passo que leva à montagem de uma nova linha, considerando não só os processos e mecanismos que fazem parte da produção de *pellets*, mas também as considerações espaciais e de manutenção que devem ser sempre consideradas no desenho do *layout* de novas fábricas.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos principais, que por sua vez estão divididos em subcapítulos.

No primeiro capítulo desta tese é feita a introdução de todo o trabalho feito. Define-se o interesse existente em termos de engenharia pela análise de linhas de produção projetadas com base em dados empíricos. Introduce-se também a metodologia de projeto que será utilizada para analisar a linha. São definidos os objetivos e dada a conhecer a estrutura utilizada na tese.

No segundo capítulo é abordada a Teoria Axiomática de Projeto em detalhe. São abordadas as bases onde esta teoria assenta, bem como definidos os pontos mais importantes para o trabalho a ser efetuado, neste caso a definição do Axioma da Independência.

O terceiro capítulo tem como objetivo fornecer informação sobre a empresa e o produto. É feita a contextualização do início da produção da empresa, e são introduzidas informações importantes sobre *pellets*.

O quarto capítulo fornece uma visão geral sobre a linha de produção que será analisada utilizando a Teoria Axiomática de Projeto. Achou-se interessante introduzir a linha de produção

em termos gerais para que a análise axiomática seguinte seja melhor compreendida. Esta introdução inclui todos as fases da produção, desde a receção da matéria-prima até à expedição do produto final.

O quinto capítulo contém a análise axiomática anteriormente referida. É o capítulo mais extenso pois contém uma análise detalhada de todos os equipamentos presentes na linha. Neste capítulo os problemas encontrados com a linha são apenas referenciados, as propostas de melhoria foram separadas da análise por motivos de clareza.

No sexto capítulo são abordadas as oportunidades de melhoria encontradas na análise anterior. Os problemas são analisados quanto à sua natureza e uma ou mais soluções são propostas para a sua resolução. Estas soluções serão concebidas de forma a que a sua implementação seja o mais simples possível.

Finalmente, no capítulo sete será feita a conclusão do trabalho. Serão analisados os objetivos iniciais e feita uma apreciação da sua concretização. Serão também feitas considerações quanto a trabalhos futuros nesta área.

2 Teoria Axiomática de Projeto

A Teoria Axiomática de Projeto é uma poderosa ferramenta tanto para conceber novos projetos como para analisar projetos existentes e encontrar melhorias a aplicar. É importante e uma grande mais-valia que um engenheiro tenha as noções da teoria axiomática bem presentes em todas as fases do projeto, pois de maneira bastante simples consegue chegar a otimizações que de outra maneira não seriam tão óbvias ou que simplesmente passariam despercebidas. Apesar de conter em si bastante ferramentas, esta tese apresentará todos os passos à luz do Axioma da Independência, que será apresentada neste capítulo.

2.1 Teoria Axiomática – O que é?

A teoria axiomática auxilia na concepção ou otimização de um projeto considerando que este assenta na relação entre 4 domínios (Figura 2.1):

- Domínio do Cliente;
- Domínio Funcional;
- Domínio Físico;
- Domínio do Processo.

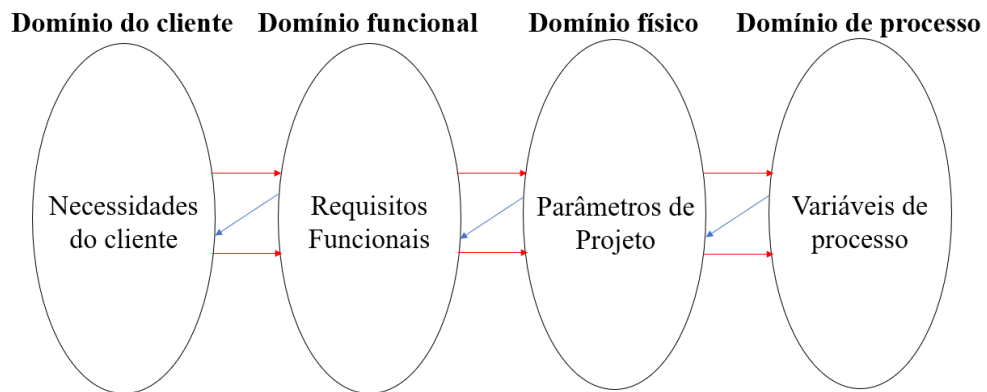


Figura 2.1 - Mapeamento dos domínios da axiomática

Esta divisão simplifica muito o raciocínio inerente ao projeto, pois projetar é um processo bastante iterativo e com um número de variáveis que muitas vezes se torna quase impossível de contabilizar. O que a teoria axiomática faz é organizar o pensamento desde a necessidade do produto (cliente) até a definição de parâmetros de produção do produto (processo), deste modo garante-se que existe uma preocupação com todos os fatores desde o início do projeto.

Em cada par de domínios contíguos, o domínio da esquerda representa o “quê?” e o domínio da direita representa o “como”. Este mapeamento vai desde o Domínio do Cliente até ao

Domínio do Processo. Assim, os dois domínios centrais são simultaneamente os “quês?” dos domínios seguintes e os “comos” dos domínios anteriores.

2.2 Definição dos Domínios

2.2.1 Domínio do Cliente

O primeiro passo de qualquer projeto deverá ser a definição da necessidade a suprir. Numa fase inicial devem ser consideradas as exigências e opiniões do cliente, de modo a formular as “Necessidades do Cliente”, que deverão ser formuladas de forma simplista e sem preocupação com termos técnicos, sendo a sua função definir exatamente o que o cliente necessita em termos leigos.

2.2.2 Domínio Funcional

Uma vez definidas as “Necessidades do Cliente”, o trabalho do projetista será encontrar “Requisitos Funcionais” para que essas necessidades sejam satisfeitas. Esta definição já requer conhecimento técnico e capacidade de identificar terminologia científica para melhor definir o problema e assim achar funcionalidades para suprir essas necessidades.

A estas funcionalidades dá-se o nome de “Requisitos Funcionais” (FRs), e como o próprio nome indica, são as funções que o produto ou serviço deve executar, são resposta direta às necessidades do cliente, sendo representados sempre como uma forma verbal e imperativa.

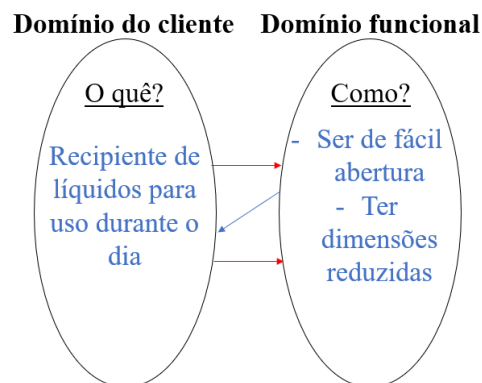


Figura 2.2 - Exemplo de definição de FR

Como se pode observar no exemplo da Figura 2.2, a definição de “Requisitos Funcionais” nem sempre é direta, e muitas vezes os requisitos não são explícitos pelo cliente. É competência do projetista avaliar as necessidades do cliente e definir todas as funções que devem ser definidas. É também importante notar que no exemplo dado apenas foram incorporados 2 FRs, mas poderiam ser muitos mais, cabe ao projetista definir o número de FRs necessários para o bom desempenho do processo, neste exemplo apenas se pretende exemplificar o processo.

2.2.3 Domínio Físico

É após a definição dos “Requisitos Funcionais” que a verdadeira essência da teoria axiomática entra em prática, pois nesta fase vão ser definidos no Domínio Físico os “Parâmetros de Projeto”. Neste domínio tenta-se responder a cada FR com um parâmetro de projeto (DP) de maneira a que cada requisito seja satisfeito.

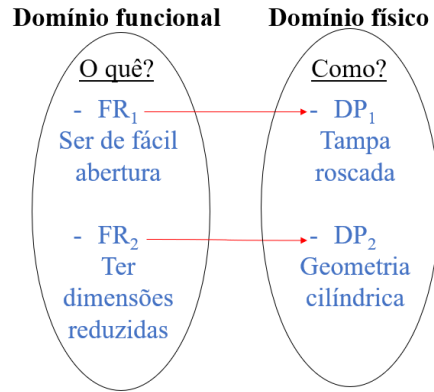


Figura 2.3 - Exemplo de definição de DP

Pode-se observar no exemplo da Figura 2.3 o que acontece na prática quando se define um DP em função de um FR. Obtém-se um parâmetro que o produto terá que suprir a necessidade funcional definida anteriormente.

É na transição do Domínio Funcional para o Domínio Físico que grande parte do projeto acontece. Aqui os FRs e DPs vão ser ramificados para encontrar relações mais aprofundadas, sendo aplicada a abordagem em *zigzague*. Esta abordagem consiste em alternar entre o Domínio Funcional e o de projeto quantas vezes forem necessárias para definir completamente as funções do produto e os parâmetros que lhes são resposta.

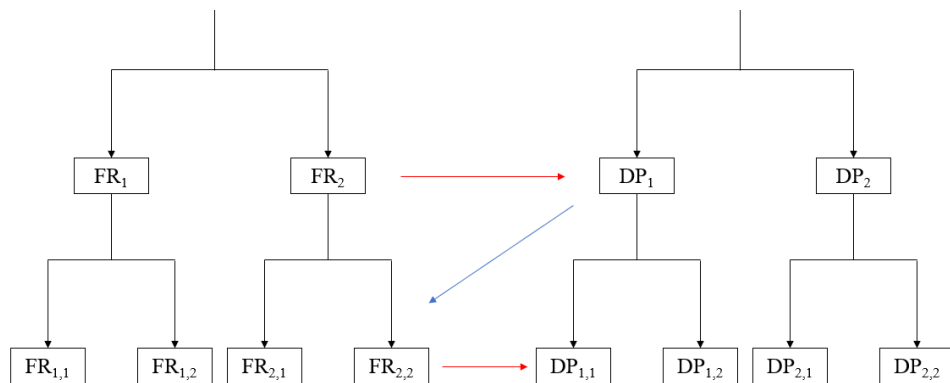


Figura 2.4 - Exemplo do procedimento em zigzague

Como se observa na Figura 2.4, os FRs de primeiro nível definem os DPs de primeiro nível. Depois com base nestes DPs são definidos FRs de segundo nível, e assim sucessivamente

até a solução encontrada estar satisfatoriamente definida. O número de níveis não é universal e deve ser sempre definido para cada projeto, usando o bom senso e o conhecimento científico do projetista até ao nível de detalhe desejado. Esta forma de decomposição também é conhecida por “zigzag”.

2.2.4 Domínio do Processo

Numa fase final do projeto, já com os “Parâmetros de Projeto” totalmente definidos, devem ser encontradas as variáveis de processo para atender aos Parâmetros de Projeto. Isto é, as variáveis que cada parâmetro de processo apresenta para variação de resultados. Estas podem ser definidas de várias formas (como velocidades, frequências ou forças, entre outras). Para qualquer DP irão existir variáveis a ter em conta, e estas são encontradas e a sua importância determinada no Domínio do Processo.

A Teoria Axiomática de Projeto apresenta dois axiomas que devem ser seguidos para que qualquer projeto seja considerado satisfatório. Sendo o primeiro denominado de “Axioma da Independência” e o segundo “Axioma de Informação”.

O Axioma da Independência é definido da seguinte forma:

“In an acceptable design, DPs and FRs are related in such a way that a specific DP can be adjusted to satisfy its corresponding FR without affecting other functional requirements” (Park, 2007)

No próximo subcapítulo este axioma será analisado mais ao pormenor, já que será a principal ferramenta de análise utilizada.

Já o Axioma da Informação é definido da seguinte forma:

“In a set of designs that satisfy the same functional requirements and conform to the independence axiom, the best is the one with the minimum information content” (Gonçalves Coelho, Mourão, & Pereira, 2005)

Este axioma é considerado quando comparando projetos que respeitem de igual forma o Axioma da Independência, sendo um meio para definir qual destes projetos é considerado mais satisfatório. A forma como esta comparação é feita consiste na análise do conteúdo de informação de cada um dos projetos. Nesta tese não será considerado este axioma.

2.3 Axioma de Independência

Este axioma aplica-se nas fases de passagem do Domínio Funcional para o Domínio Físico e deste para o Domínio do Processo. Quando se está a projetar um sistema complexo, muitas vezes a dificuldade não está na criação de soluções para os requisitos (definição de DP para cada

FR) mas sim na fase posterior em que se verificam dependências entre vários parâmetros que dificultam em muito a concretização do projeto. Por isso, na seleção do DP deve-se ter em mente o primeiro axioma – o da Independência.

O Axioma da Independência diz que os FRs devem ser independentes entre si, ou dito de outra forma, cada FR deve poder ser ajustado por um e um só DP. Se esta condição for respeitada o ajuste do parâmetro poderá ser feita unicamente para melhoria do requisito funcional que satisfaz, sem preocupação de influenciar qualquer outro, o que dá azo à criação de definições de projeto acoplado, desacoplado ou desacoplável, que irão ser explicadas seguidamente.

2.3.1 Projeto Acoplado

Este tipo de projeto acontece quando o Axioma da Independência não é respeitado e vários DPs podem estar a influenciar um único FR, isto pode ser traduzido visualmente pela equação de projeto, nomeadamente pela forma da matriz de projeto.

Supondo que temos um determinado projeto com 3 FRs e 3 DPs, deve ser feita a análise de como cada DP se relaciona com cada FR. No caso de um projeto acoplado a matriz de projeto tem simultaneamente elementos não nulos acima e abaixo da diagonal, como se exemplifica na expressão seguinte.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & \times & \times \\ \times & \times & \times \\ \times & \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad [2.1]$$

Fazendo uma análise puramente algébrica pode-se observar que todos os DPs afetam todos os FRs. Pode então observar-se que para proceder à otimização do projeto, esta terá de ser feita de forma iterativa, sendo que a cada ajuste nas variáveis de cada um dos DPs, vários FRs vão sofrer alterações. Com poucos FRs e DPs, a otimização não se torna demasiado difícil (em certos casos), porém, em projetos complexos com muitas variáveis, esta otimização torna-se muito, senão totalmente, impossível.

É exatamente este tipo de projetos que o Axioma da Independência tenta evitar, tornando o processo muito mais simples.

2.3.2 Projeto desacoplável

Muitas vezes não é possível encontrar DPs que afetem unicamente um FR. Nestes casos, a forma mais simples de garantir um certo grau de independência será considerando uma ordem específica definida pela equação de projeto, como a que pode ser observada seguidamente.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ \times & \times & 0 \\ \times & \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad [2.2]$$

Um projeto desacoplável é caracterizado por ter uma matriz de projeto triangular, isto é, uma matriz que só tem elementos não nulos acima ou abaixo da diagonal. Uma matriz triangular indica que o processo pode ser otimizado mais facilmente se for considerada uma ordem, começando pelo DP que apenas afeta um FR e seguindo o seguimento da matriz de DPs. As relações consequentes deste tipo de projeto são mais simples de tratar e deve-se escolher sempre um projeto desacoplável ao invés de um acoplado, porém, a situação ideal será sempre um projeto desacoplado

2.3.3 Projeto desacoplado

Este será o objetivo da aplicação da teoria axiomática, em concreto da aplicação do Axioma da Independência. Neste tipo de projeto cada um dos DPs afeta unicamente o FR para o qual foi projetado, resultando numa matriz de projeto diagonal (como pode ser observado na expressão seguinte).

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad [2.3]$$

Neste tipo de projeto a otimização de cada DP vai resultar em melhorias num único FR, sendo assim o processo é muito simplificado e pode produzir resultados muito melhores do que em outros tipos de projeto. A análise posterior e manutenção também fica facilitada por se poder trabalhar num único parâmetro sem ter preocupações de afetar outro tipo de função sem ser para aquela a que esse parâmetro está associado.

2.4 Aplicação ao Caso em Estudo

A teoria axiomática é muito útil na conceção de novos projetos, porém a sua utilidade não se resume a isso. Pode ser de grande importância na avaliação de projetos já implementados à luz da teoria axiomática, nomeadamente do Axioma da Independência.

Nesta tese será feito isso mesmo, a definição total do processo de produção de *pellets* à luz da teoria axiomática, dando especial ênfase aos domínios funcional e físico, determinando as ramificações dos FRs e DPs, tentando encontrar dependências que possam ser eliminadas, melhorando assim o projeto inicial e a produtividade da linha. Para esta definição será necessário um estudo profundo do processo atual, passando por todas as fases e avaliando cada parâmetro ao pormenor, chegando a níveis de ramificações elevados em que o projeto se torna muito complexo.

3 A Empresa e o Produto

3.1 A Empresa

Sedeada no Pinhal Novo desde a sua criação em 1998, iniciou a atividade com cerca de 8 trabalhadores e tinha como principal propósito a preparação da Cortiça Amadia (proveniente do 3º ou posterior descortiçamento de um sobreiro). Sendo que nesta altura procedia à trituração da falca e das aparas de cortiça.



Figura 3.1 - Vista aérea da fábrica por altura da sua abertura (ReginaCork, 2019)

Em 2001 iniciou-se o processo de desativação do setor da preparação da cortiça no qual estava inserido. A partir daqui o principal produto fabricado seriam granulados de falca para a indústria de revestimentos.

Em 2002 finaliza definitivamente a preparação da cortiça e toma os triturados de cortiça como o seu produto principal, tendo como produto complementar granulados.

Em 2008 obtém a certificação do seu sistema de gestão da qualidade, ISO 9001.

Em 2014 abriu as duas últimas linhas de produção de triturados de cortiça até hoje. Contando com 4 linhas em funcionamento a empresa emprega cerca de 38 trabalhadores.

Recentemente iniciou a produção de *pellets* de madeira, tendo a linha cerca de 2 anos. Este foi um passo natural, pois a processo de preparação da matéria-prima muitas vezes deixa para trás resíduos que muitas vezes não iriam ser utilizados, a produção de *pellets*, por assentar na utilização de restos florestais, abre a porte a uma utilização de quase todo o material que é recolhido no campo, tornando a produção da fábrica mais eficiente e proveitosa.

3.2 O Produto – *Pellets*

Antes de entrar na análise do processo de produção, é importante conhecer bem o produto que se está a produzir, para que serve, quais são as variáveis que influenciam a sua qualidade, as matérias-primas utilizadas e também a certificação que pode ser feita.

Neste caso o produto em análise são *pellets* de madeira utilizados em caldeiras industriais ou salamandras domésticas. O fim para o qual os *pellets* são fabricados é muito importante para o processo, visto que as características dos *pellets* vão determinar se podem ser utilizadas para fins domésticos ou industriais, e estas características vão ser definidas em fases iniciais do processo, principalmente na escolha da matéria-prima.

Pellets de madeira (Figura 3.2) são um combustível orgânico produzido a partir da aglomeração de recursos das florestas, desde troncos a ramagem. O facto de a matéria-prima poder ser do mais variado tipo faz com que seja um recurso que ajuda a utilização de resíduos da madeira que de outra forma poderiam ser desperdiçados. A sua produção é ainda mais atrativa para produtores de qualquer tipo de biomassa, visto que os resíduos da produção principal podem muito bem ser aproveitados para a produção de *pellets*.



Figura 3.2 - *Pellets* de madeira (Lignetics, 2019)

A queima deste combustível é feita em equipamentos apropriados. A sua ignição é feita com recurso a uma resistência elétrica e a alimentação do fogo é feita de forma automática consoante as necessidades caloríficas. Estes equipamentos podem ser domésticos (Figura 3.3) ou industriais (Figura 3.4).



Figura 3.3 – Salamandra a *pellets* (Leroy Merlin, 2019)

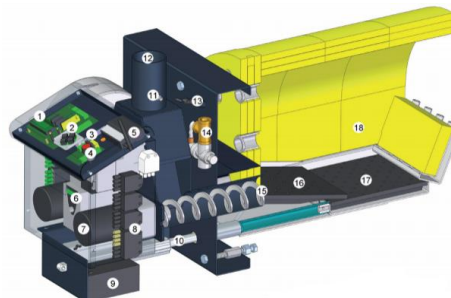


Figura 3.4 - Fornalha a *pellets* (Bioenergia, 2019)

3.2.1 Uso doméstico

Os *pellets* para uso doméstico podem ser fabricados pelo mais variado número de empresas, e uma vez que o mercado tanto nacional como internacional de *pellets* tem vindo a aumentar é necessário que haja algum tipo de normalização e certificação para que a qualidade do produto seja adequada seja qual for o produtor.

Dada esta necessidade foi criada a ENplus®, uma marca que funciona como esquema de normalização da qualidade dos *pellets*, bem como procede à certificação de empresas produtoras ou distribuidoras de *pellets*.

Na perspetiva da produção, e para esta tese, será importante prestar atenção aos diferentes níveis de qualidade de *pellets*: A1, A2 e B. A diferença entre os níveis de qualidade reside nas propriedades físicas e químicas que podem ser observadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Valores limite para parâmetros relevantes dos *pellets* (EN-Plus, 2015)

Propriedade	Unidade	ENplus® A1	ENplus® A2	ENplus® B	Norma de ensaio ¹¹⁾
Diâmetro	mm	6 ± 1 ou 8 ± 1			ISO 17829
Comprimento	mm	3,15 < L ≤ 40 ⁴⁾			ISO 17829
Humidade	w-% ²⁾	≤ 10			ISO 18134
Cinza	w-% ³⁾	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Durabilidade Mecânica	w-% ²⁾	≥ 98,0 ⁵⁾	≥ 97,5 ⁵⁾		ISO 17831-1
Finos (< 3,15 mm)	w-% ²⁾	≤ 1,0 ⁶⁾ (≤ 0,5 ⁷⁾)			ISO 18846
Temperatura dos pellets	°C	≤ 40 ⁸⁾			
PCI	kWh/kg ²⁾	≥ 4,6 ⁹⁾			ISO 18125
Densidade Aparente	kg/m ³ ²⁾	600 ≤ BD ≤ 750			ISO 17828
Aditivos	w-% ²⁾	≤ 2 ¹⁰⁾			-
Azoto	w-% ³⁾	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	ISO 16948
Enxofre	w-% ³⁾	≤ 0,04	≤ 0,05		ISO 16994
Cloro	w-% ³⁾	≤ 0,02		≤ 0,03	ISO 16994
Temperatura de Deformação da cinza ¹⁾	°C	≥ 1200	≥ 1100		CEN/TC 15370-1
Arsénio	mg/kg ³⁾	≤ 1			ISO 16968
Cadmio	mg/kg ³⁾	≤ 0,5			ISO 16968
Crómio	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Cobre	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Chumbo	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Mercúrio	mg/kg ³⁾	≤ 0,1			ISO 16968
Níquel	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Zinco	mg/kg ³⁾	≤ 100			ISO 16968

¹⁾ cinza produzida a 815 °C

²⁾ tal e qual

³⁾ base seca

⁴⁾ Um máximo de 1% dos pellets poderá ultrapassar os 40mm. Não são permitidos pellets com mais que 45mm

⁵⁾ No ponto de carregamento do veículo de transporte (camião, navio) no local da produção

⁶⁾ À porta da fábrica ou aquando do carregamento de um camião para entrega a clientes finais (*Entrega de carga total ou parcial*)

⁷⁾ À porta da fábrica, aquando do enchimento de sacos de pellets ou de Big Bags selados

⁸⁾ No último ponto de carregamento para entregas por camião ao cliente final (*Entrega de carga total ou parcial*)

⁹⁾ Igual ≥ 16,5 MJ/kg tal e qual

¹⁰⁾ O teor de aditivos na produção deverá estar limitado a 1,8 w-%, sendo o teor máximo de aditivos na pós produção (ex.: óleos de revestimentos) limitado a 0,2 w-%.

¹¹⁾ Até que as normas ISO mencionadas não sejam publicadas, as análises devem ser realizadas de acordo com as normas CEN.

É importante notar que neste momento estes parâmetros são principalmente controlados a partir da matéria-prima utilizada e de testes e verificações no final da produção, sendo que o processo neste momento é em grande parte assente em conhecimento empírico e na experiência dos técnicos e engenheiros que trabalham com o produto (à exceção das características tais como o diâmetro, comprimento e humidade, que são controlados diretamente na linha de produção).

A ENplus® também define regras sobre a utilização da matéria-prima, definindo o tipo e a origem do material a utilizar na produção, conforme pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tipos de madeira permitidos para produção de *pellets* (ENPlus, 2015)

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.

Na empresa existe certificação para produzir *pellets* de nível A1 e A2, sendo que são principalmente utilizados resíduos não tratados quimicamente da indústria do processamento da madeira (provenientes da produção de granulado de cortiça que a empresa tem como principal produção) e de resíduos de exploração florestal (a qual é feita diretamente pela empresa).

3.2.2 Uso industrial

O uso doméstico obriga a parâmetros mais apertados a serem seguidos universalmente por todos os produtores e distribuidores de *pellets*, porém a produção para uso industrial é ligeiramente diferente. Enquanto que as salamandras e lareiras a *pellets* para usos domésticos suportam pouca cinza e um aumento deste parâmetro pode levar a avarias preocupantes no equipamento, este não é o caso nas fornalhas industriais a *pellets*.

As fornalhas industriais são muitas vezes projetadas internamente, tendo uma capacidade muitos mais elevada para variações de parâmetros característicos dos *pellets*, e por isso a normalização é muito menos apertada. Não é possível ter acesso à normalização de parâmetros para uso industrial porque estas normas fazem parte do caderno de encargos da empresa para com o cliente, sendo aí definidos os valores limite para todos os parâmetros.

4 O Processo – Produção de *Pellets*

Inicialmente é importante definir o fluxo de material que passa na fábrica, desde *inputs* (matéria-prima) até aos *outputs* (*pellets* e outros), por isso é de grande ajuda desenhar o fluxograma deste processo.

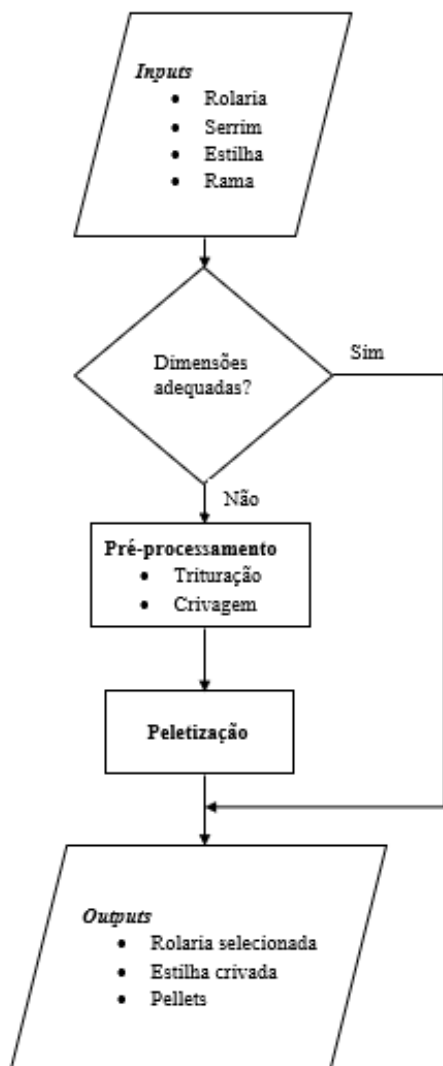


Figura 4.1 -Diagrama de fluxo

Os *inputs* de processo são do mais variado tipo, sendo assim, tem de se ter especial atenção a esta fase inicial do processo. A gestão da matéria-prima em parque é o primeiro ponto fundamental para otimizar o processo.

Analisando em detalhe a diagrama de fluxo da Figura 4.1.

Os *inputs* chegam na forma de matéria prima, podendo ser obtidos a partir das outras atividades da empresa ou comprado a terceiros. É importante distinguir nesta fase com o que se vai trabalhar:

- Elementos de rolaria – Nome técnico dado aos elementos de grandes dimensões provenientes da desflorestação (troncos).
- Estilha – Este material consiste em pequenos fragmentos de madeira triturada, de modo geral com 3 a 10 cm de comprimento.
- Serrim – À semelhança da estilha, são também fragmentos de madeira de pequenas dimensões, mais concretamente até 15 mm.
- Rama – Material verde da desflorestação. É importante observar que irá ser o material com níveis de humidade mais elevados.

Uma vez obtida a matéria-prima é feita uma seleção. A rolaria com dimensões dentro dos padrões de comercialização será separada para esse fim. Já a estilha é submetida a um processo de crivagem, sendo que os fragmentos que apresentem dimensões adequadas (cerca de 7,5 mm)

poderão ser comercializados imediatamente. É importante notar que este processo de separação é feito consoante as necessidades imediatas da empresa e dos seus clientes.

Toda a matéria-prima que não foi separada para comercialização imediata é então submetida a um pré-processamento que irá adequar as suas características à produção de *pellets*.

Após a concretização de todos os passos anteriormente descritos obtêm-se os *outputs*:

- *Pellets* de madeira – definidos no capítulo anterior
- Rolaria selecionada – Elementos de rolaria que apresentam dimensões dentro dos padrões de comercialização.
- Estilha crivada – Estilha que apresenta dimensões até 7,5 mm.

A rama e os elementos de rolaria que não apresentem dimensões adequadas são então transformados em estilha para que possam ser utilizados na produção de *pellets*.

Uma vez compreendidos de forma geral os passos que antecedem e procedem a produção dos *pellets*, as atenções podem ser viradas para essa produção propriamente dita. Mais uma vez tudo fica simplificado utilizando um fluxograma de processo (Figura 4.2).

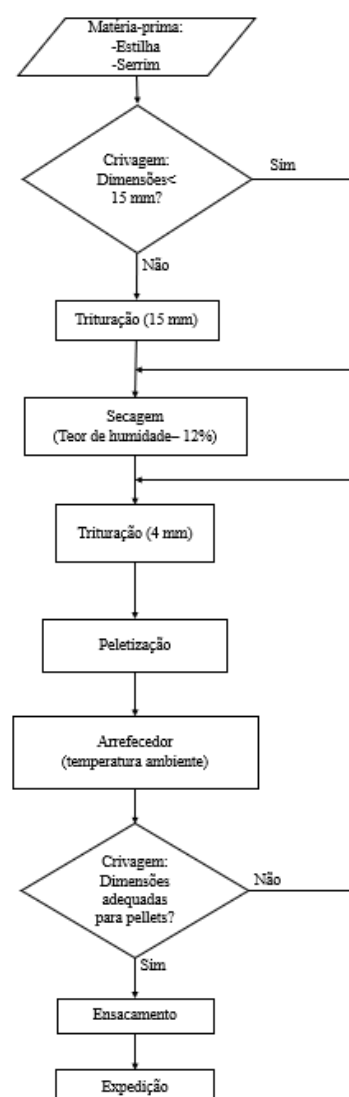


Figura 4.2 - Fluxograma

Os inputs deste processo são a estilha e o serrim, como já foi observado anteriormente, porém por serem matérias-primas com características diferentes não devem nunca ser tratadas da mesma forma.

- A estilha, de maiores dimensões, passa por um processo de trituração (apelidada por moagem verde por não ser feito nenhum controlo de humidade antes desta). O *output* deste processo serão fragmentos com diâmetros a variar entre os 10 e os 15 mm, ainda com níveis de humidade elevados.
- Após a moagem verde o produto é misturado com o serrim. A mistura resultante passa por um processo de secagem, em que os níveis de humidade vão ser reduzidos a valores que rondam os 10%.
- Depois de seco, o produto é moído mais uma vez, num processo apelidado de moagem seca, tendo como objetivo a redução do diâmetro dos fragmentos para cerca de 4 mm. É importante que a moagem seja feita em duas vezes (antes e depois da secagem) pois a secagem reduz as dimensões dos fragmentos, porém não de forma linear. Para rentabilizar a secagem, os fragmentos já devem ter dimensões reduzidas, mas que devem ser controladas mesmo após esta secagem, por isso existe a necessidade de uma moagem depois do processo de secagem que reduz as dimensões para o nível necessário.
- Após a obtenção de fragmentos de dimensões aceitáveis é iniciada a operação que dá a forma aos *pellets*. O material é colocado na prensa, que é constituída por um tambor com orifícios por onde sai o material à pressão (tamanho dos orifícios regula o diâmetro dos *pellets*). O material é pressionado por rolos dentro do tambor, saindo pelos orifícios, este processo gera altas temperaturas que fazem com que a resina natural do material (lignina) forme a camada exterior dos *pellets*. Estes cilindros que saem do tambor são então cortados utilizando um pente de corte fixo na máquina.
- Os *pellets* obtidos estão as temperaturas altas, e passam por um processo de arrefecimento. Este consiste na colocação dos *pellets* num mecanismo próprio que os armazena durante um determinado período de tempo enquanto um fluxo de ar frio é forçado por entre os *pellets* em repouso.
- Depois de arrefecidos até à temperatura ambiente, os *pellets* são passados por um crivo, que separa o pó, sendo que os *pellets* seguem para o processo de armazenamento e o pó é reutilizado para outros fins.

Chega-se então a uma fase em que se tem um entendimento geral do processo que transforma as matérias-primas em *pellets*, porém para melhorar o processo deve-se conhecer cada passo de forma pormenorizada.

4.1 Vista Pormenorizada das Tecnologias e Processos de Peletização

4.1.1 Pré-processamento

Como já foi abordado anteriormente a matéria-prima pode ser dos mais variados tipos, desde rolaria (troncos inteiros) a serrim. Porém existem muitos outros fatores para além da forma e do tamanho dos fragmentos que devem ser considerados na produção dos *pellets*.

O tipo de madeira que se usa é muito importante. Até agora este controlo é tipicamente feito de forma empírica, por análise de especialistas à matéria-prima recebida para determinar os parâmetros de secagem e velocidades de alimentação no processo de peletização. Porém este conhecimento é obtido por experiência no campo, sendo que nesta fase inicial ainda não existem dados concretos. Na Figura 4.3 podem ser observadas pilhas de material diferente, todos utilizados para a produção de *pellets*.



Figura 4.3 - Pilhas de matéria-prima

O parqueamento da matéria-prima é também importante relativamente ao campo de produtividade. Muitas vezes o controlo do parque onde ficam armazenadas as matérias-primas não é feito da melhor maneira, isto pode levar aos mais variados problemas (exemplo da Figura 4.4).



Figura 4.4 - Exemplo de erro de armazenamento

- Um problema evidente será o descontrolo da gestão de stocks. Se novos carregamentos são colocados sem regra não haverá controlo do local, tipo de material ou até tempo de armazenamento de cada carregamento, isto faz com que a análise do material seja mais difícil e pode causar perdas de tempo.
- Outro problema tem diretamente a ver com os caminhos por entre as pilhas de material. A estilha é armazenada ao ar livre e em grandes pilhas (Figura 4.3). Muitas vezes de forma a descarregar mais depressa os condutores dos camiões tendem a descarregar sempre no mesmo local, muitas vezes formando “muros” de estilha, que, ou são reorganizados por operadores em empilhadores, ou simplesmente se mantêm, sendo um impedimento à passagem das empilhadores que transportam o material, o que causa perdas de tempo e muitas vezes interrupção do normal fluxo de matéria-prima.
- O parque é um sítio de circulação de carros, empilhadores, tratores, etc... por isso podem muitas vezes existir agentes contaminadores no chão (vidros, plásticos). Isto representa um problema se o carregamento for feito sem regra, por vezes podem ser misturados na matéria-prima estes contaminadores que podem influenciar a qualidade dos *pellets*, ou também, causar danos nas máquinas utilizadas para a pré-preparação e peletização.

Para que haja uma alimentação estável de matéria-prima à linha não se poderia depender unicamente de um operador a colocar material no transportador de correia que inicia o processo, por isso é utilizado um silo de grandes dimensões, que contém a estilha e fornece este material a um ritmo adequado.

O silo é constituído fundamentalmente pelo contentor e pelo sistema de abastecimento (como se pode observar na Figura 4.5).



Figura 4.5 - Silo de estilha

O fornecimento assenta em 3 bases móveis (destacado na Figura 4.6) cujo movimento é controlado por 3 atuadores. O movimento destas bases vai fazer com que o material mude de posição de maneira a que este caia para o transportador de correia (Figura 4.7) que o levará até ao próximo estágio de produção.



Figura 4.6 – Bases móveis



Figura 4.7 – Transportador de correia

Sendo a matéria-prima introduzida na linha, a primeira coisa a fazer será peneirá-la de maneira a separar fragmentos de menores dimensões (que não necessitam do primeiro processo de moagem), e a separar contaminantes metálicos que poderiam causar falhas nos equipamentos. Para isto o material passa por um crivo (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Crivo rotativo

De seguida, o material que segue no transportador (Figura 4.9) passa por um magneto permanente (Figura 4.10) que recolhe todas as partículas metálicas que podem estar a contaminar a matéria-prima.



Figura 4.9 - Transportador de correia



Figura 4.10 – Magneto Permanente

É interessante notar que na Figura 4.9 pode-se observar uma queda de material para o solo devida às características do transportador. A posterior análise deste equipamento pode levar a melhorias na produtividade.

Depois de devidamente crivada, a estilha passa por um processo de trituração para reduzir as suas dimensões antes do processo de secagem. Esta trituração é levada a cabo por um moinho de martelos semelhante ao representado na Figura 4.11.

Não se procede logo para o processo de secagem, pois a estilha inicial tem dimensões demasiado elevadas e heterogéneas, o que é prejudicial para a produtividade neste processo.



Figura 4.11 - Moinho (martelo triturador) (AZEUS PELLET MILL, 2019)

A matéria-prima é conduzida até ao interior do moinho, entrando na câmara de alimentação. É então moída sob as batidas de martelos, que rodam em alta velocidade. O moinho tem uma espécie de filtro que deixa passar fragmentos apenas com tamanhos inferiores aos estipulados (tipicamente, nesta fase, os fragmentos terão entre 10 e 15 mm). O resíduo processado é descarregado através da força centrífuga e do fluxo de ar.

O moinho em questão será analisado à luz da teoria axiomática de modo a entender melhor o seu funcionamento e possíveis melhorias.

Uma vez homogeneizados os fragmentos de madeira (antes da secagem é feita a incorporação do serrim) é feita a redução do teor de humidade da mistura. Tipicamente a biomassa apresenta valores de humidade a rondar os 50%, valor inaceitável para a produção de *pellets* de qualidade (devido às características definidas pela ENPlus e pelos clientes industriais).

O processo de secagem resulta em valores de humidade abaixo dos 12%. Durante a secagem a mistura passa por um tambor rotativo que seca o material por intermédio de um fluxo contínuo de ar quente. O ar quente é obtido por combustão de pó de cortiça numa fornalha, este combustível resulta numa combustão muito eficiente e constante, o que torna o processo de secagem muito eficiente. O tambor rotativo tem uma configuração interior que pode ser observada na Figura 4.12.

As “saliências” que podem ser observadas na Figura 4.12 servem dois propósitos: são um meio de garantir o movimento constante da mistura a ser seca, o que garante uma secagem uniforme e funcionam como alhetas, absorvendo calor devido à sua pequena espessura e entrando em contacto com o material no tambor, transferem calor, o que torna o processo de secagem mais eficiente.



Figura 4.12 - Interior de um secador de tambor rotativo (SeaSun Machinery, 2019)

Este é o tipo de equipamento utilizado na linha, porém existem outros tipos de “secadores”, pelo que será interessante perceber se existem acoplamentos que possam ser resolvidos incorporando soluções encontradas em tipos diferentes de equipamentos.

Após a secagem; a mistura é passada novamente por um moinho, que reduz as dimensões dos fragmentos para valores a rondar os 4 mm, é um processo em tudo semelhante à moagem verde, sendo que tem gastos de energia inferiores pois o material encontra-se com percentagens de humidade inferiores.

Uma vez obtido o material de dimensões adequadas e devidamente seco este é armazenado num silo semelhante ao visto anteriormente. A matéria-prima é então verificada quanto ao teor de humidade, já que é importante que o teor de humidade não seja demasiado baixo e ponha em causa o processo de peletização.

Existe ainda um misturador montado na linha, que não está a ser utilizado de momento, mas que está preparado para regular a humidade do material consoante o necessário para a produção de *pellets* para uso doméstico com especificações mais apertadas.

4.1.2 Peletização

Após a obtenção da mistura de madeira devidamente triturada e com teor de humidade adequado, esta passa por uma “prensa peletizadora” que dá forma aos *pellets*. O material é conduzido até ao interior da prensa, cuja câmara tem uma configuração como apresentado na Figura 4.13.

Pode ser observada na Figura 4.14 matriz de extrusão dos *pellets*. O material é pressionado por ação dos rolos (que se podem observar na figura à esquerda) na matriz peletizadora, sendo extrudido pelos furos que apresenta e que controlam o diâmetro do produto final. Após atingirem o comprimento correto; os *pellets* são cortados com recurso a um pente de corte fixo na zona superior do tambor. Este pente já foi introduzido para otimização do processo, visto que a máquina original apresentava no seu lugar duas facas que eram colocadas mediante a necessidade do comprimento.



Figura 4.13 - Câmara de peletização



Figura 4.14 - Matriz de peletização

Dos equipamentos utilizados, este é o que apresenta maior exclusividade para a produção de *pellets*, tendo por isso a maior otimização para esse fim, tendo sido até já melhorado na empresa. Porém irá ser analisado também, não só para encontrar melhorias como também para entender melhor as alterações feitas ao mecanismo original.

4.1.3 Pós-processamento

Após a extrusão dos *pellets*, estes encontram-se a temperaturas muito elevadas, pelo que passam por um processo de arrefecimento. O produto é colocado num arrefecedor que armazena os *pellets* e faz passar um fluxo de ar por entre eles. O ar quente que é emanado pelos *pellets* é retirado por ação de ventiladores, o que faz com que o teor de humidade dos mesmos baixe e que sejam arrefecidos até à temperatura ambiente. O processo está estudado e o tempo que ficam em repouso depende do tempo que é necessário para acumular *pellets* até uma certa altura no arrefecedor, um sensor é então acionado para abrir uma porta na parte inferior, fazendo os *pellets* cair por ação da gravidade.

Após serem arrefecidos até à temperatura ambiente são armazenados num silo que dispensa a quantidade adequada para a alimentação de um crivo.

Passam então por um processo de crivagem que separa os *pellets* dos finos (partículas pequenas de material), sendo que estes resíduos são separados e reutilizados para outros fins. Já os *pellets* são encaminhados para armazenamento ou ensacamento.

4.1.4 Sistemas complementares

Ao longo do processo existem vários momentos em que a produção de pó pode ser elevada. Para que este não seja enviado diretamente para a atmosfera por intermédio dos ventiladores, deve ser feita uma filtragem.

Esta filtragem é feita com recurso a vários filtros de mangas dispersos pela fábrica e ligados às máquinas dos processos mais críticos na produção de pó, tais como:

- Crivo inicial;
- Moinho de verdes;
- Moinho de secos;
- Arrefecedor.

Todos estes mecanismos levam cabo algum tipo de função propensa ao levantamento de poeiras, seja ela a separação, trituração ou arrefecimento dos pellets por intermédio de fluxo de ar. Qualquer um destes mecanismos terá um escape de gases saturados com partículas de madeira.

No caso do filtro de mangas ligado ao crivo inicial, este recolhe as partículas de pó geradas pelo processo de crivagem, sendo estas misturadas com a estilha de 7.5 mm e diretamente comercializadas.

Os processos de moagem também geram muito pó, pelo que após a trituração o material passa por um ciclone que faz com que as partículas mais densas caiam e sigam para os processos seguintes, enquanto que as partículas menos densas ficam na parte superior do ciclone, sendo então levadas pelo fluxo de ar para o filtro de mangas para serem filtradas. No caso do moinho de verdes as partículas são misturadas com as partículas filtradas pelo filtro do crivo inicial. No caso da moagem seca as partículas são levadas até ao silo anterior à prensagem.

O processo de arrefecimento e ensacamento também pode gerar grandes quantidades de pó, por isso o fluxo de ar faz com que essas partículas sejam conduzidas até a um filtro de mangas, que posteriormente leva o material filtrado para o silo anterior à moagem seca, pois grande parte das partículas pode já estar aglomerada.

Ao longo da linha o material adota diferentes comportamentos mediante o tamanho dos seus componentes e o teor de humidade nele contido, por isso a forma como é movimentado deve ter isso em consideração.

Ao longo da linha existem transportadores de correia, que são responsáveis pelo encaminhamento de material com dimensões mais elevadas, tal como a estilha.

Existem também transportadores de parafuso sem-fim. A rotação deste parafuso faz com que o material seja encaminhado na direção pretendida, este tipo de distribuição é ideal para material com uma granulometria mais baixa, tal como o serrim e a mistura que resulta da moagem a seco.

Também existem transportadores pneumáticos o pó que se gera em alguns processos para filtros por ação de ventiladores. Neste caso as partículas são de tão pequenas dimensões e densidade que o fluxo de ar é suficiente para as movimentar eficientemente

Após a secagem do material o perigo de incêndio é alto, e devido à ventilação existente dentro dos tubos de distribuição um incêndio pode ter consequências muito graves, por isso, após a secagem da matéria prima, todos os tubos de distribuição estão equipados com sistemas de extinção de incêndios que visam não só extinguir qualquer faíscas como também retirar o material do tubo.

4.1.5 Testes e verificações

Há ainda na empresa uma inspeção regular dos *pellets* quanto a:

- Teor de humidade;
- Durabilidade mecânica;
- Granulometria.

De notar que todos estes fatores são observados no final da produção, sendo que não existe verificação anterior da matéria prima ou uma verificação em tempo real dos fatores que influenciam as características finais dos *pellets*.

4.2 Considerações Gerais

Será útil para uma análise inicial dividir o processo em 3 estágios:

- Pré-processamento – onde entram a receção e armazenamento da matéria-prima
- Processamento – todo o processo de produção dos *pellets* até à sua obtenção
- Pós-processamento – processo de armazenamento e ensacamento dos *pellets* finalizados.

Quanto ao pré-processamento, existe uma possibilidade de melhoria muito alta. Neste momento não existe um grande controlo da matéria-prima que entra em fábrica nem como é

armazenada, havendo mistura de materiais e problemas na alimentação das máquinas de processamento inicial.

No campo do processamento a estratégia a utilizar passa por uma análise detalhada de cada um dos equipamentos para encontrar possíveis acoplamentos, isto significa um estudo intensivo não só do equipamento existente como também de outros equipamentos do mesmo tipo existentes no mercado, para que se possam encontrar soluções já testadas e com efeitos de melhoria imediatos.

O pós-processamento consiste no armazenamento e ensacamento dos *pellets* já fabricados. Este processo está bastante automatizado, sendo que o silo de ensacamento está equipado com um sensor de massa que pode ser ajustado para o ensacamento de *Big Bags* (sacos de 1000 kg tipicamente utilizados para armazenamento ou para clientes industriais) ou sacos de 15 kg (tipicamente utilizados para comercialização para uso doméstico ou industrial).

Para além destes 3 estágios existem também sistemas complementares que desempenham funções como a filtragem de ar ou prevenção de incêndios. Estes sistemas apesar de serem muito importantes para o funcionamento da linha, não influenciam diretamente a produção de *pellets*.

5 Análise Axiomática à Linha de Produção

5.1 Nível 1

Para entender profundamente o processo de produção de *pellets* será necessário perceber as fases de produção importantes para a obtenção do produto final. Para isso é vantajoso começar a análise olhando o processo como um todo, antes de analisar cada mecanismo individualmente, assim, poderá ser determinada a importância de cada um dos mecanismos bem como a sequência utilizada.

Ainda no Domínio do Cliente, a análise do processo como um todo poderá ser obtida se este for analisado como se estivesse ainda em fase de elaboração, por isso, define-se a necessidade do cliente como a montagem de uma linha de produção de *pellets* de madeira, cuja matéria-prima pode ser estilha e serrim.

Os *pellets*, como anteriormente foi visto, são um produto obtido da aglomeração de matéria-prima, porém para a produção de *pellets* será inicialmente necessário prepará-la quanto às dimensões e teor de humidade para que a peletização ocorra sem percalços. Pode-se então definir o primeiro Requisito Funcional de uma linha de produção de *pellets*:

FR₁ – Preparar a matéria-prima para a peletização;

A preparação da matéria-prima não é um processo simples. Para que os *pellets* tenham a qualidade pretendida e que o processo seja produtivo existem duas áreas principais a ser consideradas: o teor de humidade do material e as suas dimensões. Por isso o primeiro parâmetro de projeto terá de ser um sistema, ao invés de um só mecanismo, define-se então:

DP₁ – Sistema de preparação de matéria-prima;

Este sistema terá de suprir várias necessidades que irão ser vistas numa fase posterior desta tese, quando este for analisado ao pormenor e descobertos cada um dos mecanismos envolvidos, bem como a sua sequência.

Após a preparação da matéria-prima passa-se então à produção dos *pellets* propriamente ditos. É necessário que a matéria-prima adquira a consistência e dimensões adequadas, a este processo dá-se o nome de peletização, sendo assim encontrado o segundo requisito funcional da linha:

FR₂ – Peletizar o material;

Para este efeito será necessário um equipamento que confira ao material as características necessárias, isto pode ser atingido com apenas um equipamento, e por isso é definido o parâmetro de projeto:

DP₂ – Prensa peletizadora;

As características que este mecanismo terá de conferir ao material irão ser vistas numa fase posterior, quando este for analisado ao pormenor.

Por fim, já com o material aglomerado, é necessário proceder ao seu armazenamento tendo em conta a comercialização. O ensacamento dos *pellets* é feito de formas diferentes para clientes diferentes. Também será necessário ter em conta possíveis “contaminantes” que possam dificultar o armazenamento ou afetar a qualidade dos *pellets*. Por isso, define-se o requisito funcional:

FR₃ – Preparar os *pellets* para expedição;

Como já foi constatado no parágrafo anterior, existem vários fatores a ter em conta quando se considera o ensacamento e expedição dos *pellets*, por isso é necessário um sistema que considere cada um dos pontos pertinentes, definindo-se assim:

DP₃ – Sistema de pós-produção.

As definições até agora consideradas são relativas ao processo de produção “direta”, em que o material é transformado no produto final por vários processos. Porém, uma linha de produção deve considerar mais do que isto. Deve considerar também a movimentação do material, a reaproveitamento de “desperdício” e a prevenção de situações perigosas, e por isso terão de ser considerados mais alguns Requisitos Funcionais. O primeiro destes sistemas complementares a ser considerado será o relativo ao transporte do material.

FR₄ – Transportar o material entre processos

Este transporte não é simples, sendo que o material passa por várias fases, e por isso merece uma análise detalhada. Nesta fase define-se simplesmente como “sistema de distribuição” para que posteriormente se possam analisar todos os seus componentes.

DP₄ – Sistema de distribuição e alimentação

Qualquer linha de produção produz desperdício, porém, se bem projetada irá reduzir e reaproveitar este material, bem como evitar o seu escape descontrolado para a atmosfera, sendo que muitas vezes pode ser constituído por partículas de baixas dimensões. Também se deve evitar que fumos poluentes possam escapar para a atmosfera sem antes serem filtrados para que os componentes prejudiciais ao ambiente possam ser eliminados convenientemente. Fica então evidente uma necessidade de filtragem, traduzida pelo requisito funcional seguinte.

FR₅ – Filtrar ar

Uma vez que existem vários tipos de desperdício e vários tipos de escape nesta linha, o processo de filtragem deve considerar as especificidades de cada um destes, para isso será considerado um sistema de filtragem, constituído por todos os mecanismos que procedem à limpeza de gases e reaproveitamento de resíduos.

DP₅ – Sistema de filtragem e reaproveitamento

Por fim, deve ser considerado o material e o produto que está a ser produzido: um combustível. O risco de incêndio é preocupante em qualquer linha de produção, porém nesta, esta preocupação deve ser redobrada visto que o material tem condições para alimentar um incêndio de dimensões muito preocupantes, podendo as consequências serem a total destruição das instalações e até perda de vidas. Por isso torna-se óbvio que em quaisquer linhas de produção de combustíveis deste tipo, a prevenção deve ser considerada um requisito funcional:

FR₆ – Prevenir e extinguir incêndios

Para isto deve ser instalado um sistema que seja responsável pela detecção e extinção de possíveis faíscas ou chamas em qualquer fase do processo, com especial ênfase nas últimas, em que o material tem um teor de humidade bastante baixo.

DP₆ – Sistema de detecção e extinção de incêndios

Uma vez definidos os FRs e DPs deste nível da análise, deve ser elaborada a equação de projeto de forma a analisar os possíveis acoplamentos existentes. A equação de projeto está então representada abaixo.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6 \end{bmatrix} \quad [5.1]$$

Por ser uma análise ao processo, e estar dividido por fases bem delineadas, o processo tem neste momento características de um projeto desacoplado. Isto é um indicador de que a linha está globalmente bem projetada mesmo sem o conhecimento consciente por parte dos responsáveis da importância da independência funcional. Uma vez dividido satisfatoriamente o processo as análises posteriores ficam facilitadas.

Desta análise podem-se retirar algumas conclusões:

- O processo está dividido em 3 campos específicos que são:

- A pré-produção que prepara a matéria-prima para que o processo de peletização seja bem-sucedido.
 - A produção que transforma a matéria-prima em *pellets*.
 - A pós-produção, que armazena convenientemente os *pellets* para a sua comercialização.
- Para além dos campos acima destacados, existem ainda 3 FRs que funcionam ao longo de toda a linha de forma complementar.

Uma vez feita a primeira análise, é altura de utilizar o procedimento em ziguezague para fazer a decomposição do projeto. Começa-se naturalmente pelo primeiro parâmetro de projeto.

5.2 Nível 2

5.2.1 DP₁ – Sistema de preparação da matéria-prima

Antes de mais, para analisar este parâmetro, deve-se entender quais são os fatores em jogo. Neste caso, o principal foco estará em alterar as características da matéria-prima, para que estas sejam aceitáveis para a produção de *pellets*. Para este efeito é necessário conhecer as características da matéria-prima com que se trabalha, bem como as características necessárias para a produção.

Como visto anteriormente, a biomassa utilizada para a produção de *pellets* (na forma de estilha, serrim ou rama) tem, tipicamente, teores de humidade a rondar os 50%. Já a produção de *pellets* exige que este valor seja inferior a 12%. Sabendo isto, pode ser definido o primeiro FR para o sistema de preparação de matéria-prima.

FR_a – Reduzir o teor de humidade da matéria-prima para valor <12%

No entanto, a redução do teor de humidade da matéria-prima não é a única exigência da pré-preparação. As dimensões da matéria-prima também têm de ser ajustadas, sendo que para a peletização as dimensões do material devem ser inferiores a 4 mm de diâmetro. A estilha tem dimensões compreendidas entre os 3 a 10 cm, enquanto o serrim apresenta dimensões muito heterogéneas a variar até aos 15 mm. Fica então clara a necessidade de regularizar as dimensões para as pretendidas.

FR_b – Regularizar as dimensões da matéria-prima para cerca de 4 mm

É nesta fase que o cariz empírico de uma linha de montagem entra em conflito com a teoria, sendo que com uma análise à linha podem-se observar vários mecanismos ordenados de maneira fixa que procedem à concretização dos Requisitos Funcionais. O procedimento que irá

ser adotado passará pela enumeração de todos os mecanismos como DPs para perceber como se relacionam com os Requisitos Funcionais. Sendo assim os mecanismos são:

DP_{1,1} – Crivo rotativo

DP_{1,2} – Moinho de martelos (verdes)

DP_{1,3} – Secador de tambor rotativo (Figura 5.1)

DP_{1,4} – Moinho de martelos (secos) (Figura 5.2)



Figura 5.1 - Secador de tambor rotativo



Figura 5.2 - Moinho

Por observação da linha pode-se observar que os FRs inicialmente definidos não são os únicos devem ser satisfeitos para que a linha opere de forma satisfatória e eficiente.

O primeiro caso que é interessante ser observado, é a presença de dois moinhos de trituração, um antes e outro após a secagem, quando inicialmente só se definiu que o material teria de ter dimensões inferiores a 4 mm.

Isto advém da necessidade de potenciar a produtividade de cada um dos processos. Por um lado, a secagem é muito mais eficiente quando se utiliza matéria-prima de menores dimensões, pelo outro a trituração de material com alto teor de humidade é muito mais difícil. Tendo isto em mente, fazer com estas operações fossem feitas de uma só vez até aos valores estipulados levaria ao decréscimo de produtividade e ao aumento do consumo energético.

A solução encontrada para aumentar a produtividade dos processos foi efetuar a trituração em dois momentos: antes e após a secagem, desta forma as dimensões da matéria-prima são reduzidas de forma a otimizar o processo de secagem, enquanto que a maior diminuição de dimensões do material se reserva à trituração a seco, que tem custos energéticos muito mais reduzidos. Foi definido por conhecimento empírico que as dimensões finais do material após a primeira trituração sejam de 15 mm, enquanto que os 4 mm finais são mantidos.

Por fim, deve-se notar que a matéria-prima apresenta valores dimensionais muito heterogêneos, existindo até mistura de serrim. Este tem dimensões inferiores a 15 mm e a sua passagem pelo moinho de verdes não acrescenta valor à linha de produção, sendo que até reduz a produtividade da moagem, por isso torna-se evidente que para efeitos de aumento de produtividade é importante que seja feita uma separação da matéria-prima no início da linha de produção.

Tendo em vista estas considerações, os FRs deste capítulo devem ser redefinidos para que possam espelhar completamente as necessidades da linha, ficando definidos como:

FR_{1,1} – Separar fragmentos com dimensões inferiores a 15 mm

FR_{1,2} – Reduzir as dimensões do material para valores inferiores a 15 mm

FR_{1,3} - Reduzir o teor de humidade da matéria-prima para valor <12%

FR_{1,4} – Reduzir as dimensões do material para valores inferiores a 4 mm

Todos estes FRs são satisfeitos com recurso aos DPs anteriormente apresentados, pelo que a matriz de processo fica com o aspeto:

$$\begin{bmatrix} FR_{1,1} \\ FR_{1,2} \\ FR_{1,3} \\ FR_{1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,1} \\ DP_{1,2} \\ DP_{1,3} \\ DP_{1,4} \end{bmatrix} \quad [5.2]$$

Resulta então num projeto desacoplado, o que seria de esperar pois os FRs são satisfeitos por mecanismos independentes.

5.2.2 DP₂ – Prensa peletizadora

Uma vez obtida a matéria-prima aceitável para a aglomeração procede-se a esse mesmo processo. A peletização é feita recorrendo a um único equipamento, designado por “prensa peletizadora” (Figura 5.3).



Figura 5.3 - Prensa peletizadora

A prensa peletizadora aglomera o material segundo a geometria necessária, geometria essa que é estabelecida como cilíndrica, com diâmetro e comprimento fixo (especificações técnicas dos *pellets* apresentadas no capítulo 3.2), pelo que os “Requisitos Funcionais” iniciais ficam definidos:

FR_{2,1} – Conferir aos *pellets* diâmetros entre 6 e 8 mm

FR_{2,2} – Conferir aos *pellets* comprimento entre 3,15 e 40 mm

FR_{2,3} – Conferir aos *pellets* a consistência necessária.

Estes são os três pontos principais que devem ser atendidos por este equipamento. Uma vez atingidos irão ser produzidas *pellets* com as características físicas aceitáveis para a comercialização.

É também necessário considerar FRs que garantam não só a correta entrada de material, como a correta saída dos *pellets*, pois o fluxo de material na linha de produção é um ponto fundamental. Quanto à entrada de material, o FR é definido da seguinte forma:

FR_{2,4} – Regularizar o caudal de material à entrada

Quanto à saída de *pellets*, a definição do FR deve contemplar que estes são cortados em movimento e imediatamente à saída da matriz de peletização. Estes fatores fazem com que os *pellets* sejam expelidos com altas velocidades e temperatura, por isso, a prensa deve garantir que estes não são espalhados pelo chão no momento da sua saída.

FR_{2,5} – Evitar a dispersão dos *pellets* à saída

A forma como são atendidos os FRs é diferente em cada tipo de prensa, porém nesta tese será observada a que é utilizada na empresa, uma prensa de matriz circular.

Pela análise do processo vista no capítulo 4.1.2 pode-se concluir que a câmara de peletização (Figura 5.4) representa uma área muito interessante a nível de processo. É nesta câmara que estão presentes muitos dos equipamentos responsáveis pela peletização do material.



Figura 5.4 - Câmara de peletização

Para conferir o diâmetro correto aos *pellets* são utilizados os furos na matriz circular (representada na Figura 5.5), pelo que este é um importante parâmetro de projeto.

DP_{2,1} – Matriz de peletização (Figura 5.5)



Figura 5.5 - Matriz de peletização

O comprimento é garantido por um pente de corte situado no exterior da câmara de peletização, logo será o parâmetro de projeto que assegurará FR_{2,2}.

DP_{2,2} – Pente de corte

A consistência dos *pellets* é algo mais complexo. Não depende inteiramente da prensa de peletização, visto que as características da matéria-prima que dá entrada devem ser sempre consideradas. O parâmetro que afetará a consistência serão os rolos presente no interior da prensa, já que estes são os responsáveis pela aplicação das forças que irão forçar o material pela matriz.

DP_{2,3} – Rolos da prensa

Uma vez consideradas as forças existentes na câmara de peletização, torna-se obvio óbvio que o atrito pode ser problemático, por isso, terá de ser considerado um novo FR para que o funcionamento do mecanismo seja correto.

FR_{2,6} – Atenuar as forças de atrito entre o material e a matriz

Para esta atenuação não pode ser utilizado um lubrificante qualquer, pois este poderia contaminar o material e levar a que as *pellets* não tivessem as características necessárias, por isso é apenas utilizado vapor de água, introduzido na mistura à entrada da prensa, para que o contacto entre o material e a matriz não gere forças de atrito de magnitude demasiado elevada.

DP_{2,6} – Jatos de vapor de água

Por fim serão considerados os FRs relativos à entrada e à saída do material. Para a regularização do caudal de entrada, o equipamento utilizado é um sem-fim.

DP_{2,4} – Sem-fim

É interessante notar que é no tubo deste sem-fim que são colocadas as entradas do vapor de água considerado no DP_{2,6}.

A velocidade angular do sem-fim, responsável pelo caudal de material à entrada da prensa, será regulada consoante a leitura a força a ser exercida pelo motor da prensa.

A leitura da força é feita pelos operadores na sala de controlo. Se a força for demasiado elevada significa que o equipamento está em esforço, provavelmente por existir uma quantidade demasiado elevada de material na câmara. A redução da velocidade angular do sem-fim de entrada soluciona este problema.

Um aumento da força pode também significar que o material tem um teor de humidade demasiado elevado, por isso deverá ser feita uma análise visual aos *pellets* à saída para garantir que este não é o caso (*pellets* formados com material demasiado húmido têm características visuais muito distintas, sendo que em muitos casos a aglomeração não é feita satisfatoriamente).

Quanto ao FR_{2,5}, foi possível observar que existe uma grande dispersão de *pellets* no chão na zona circundante da prensa, como pode ser observado na Figura 5.6.



Figura 5.6 - Dispersão dos *pellets* à saída da prensa

Esta dispersão deve-se ao facto de não existir de momento um DP que assegure o FR_{2,5}. O equipamento demonstra desta forma não só a possibilidade, como também a necessidade de melhoria.

Foram então definidos os FRs e os DPs, podendo ser elaborada a equação de projeto:

$$\begin{bmatrix} FR_{2,1} \\ FR_{2,2} \\ FR_{2,3} \\ FR_{2,4} \\ FR_{2,5} \\ FR_{2,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{2,1} \\ DP_{2,2} \\ DP_{2,3} \\ DP_{2,4} \\ DP_{2,6} \end{bmatrix} \quad [5.3]$$

São então visíveis dois problemas de projeto nesta equação. O primeiro problema reside no facto de o FR_{2,5} não ser satisfeito por nenhum DP.

O segundo problema é o acoplamento visível devido à relação do FR_{2,3} e do FR_{2,6} com os respetivos DPs. Este acoplamento leva a que o funcionamento da prensa tenha de ser constantemente regulado manualmente, para que a consistência dos *pellets* seja correta e o esforço exercido pela prensa não seja demasiado elevado.

Estes problemas serão então considerados no capítulo referente às possibilidades de melhoria.

5.2.3 DP₃ – Sistema de pós-produção

Após a produção dos *pellets*, ainda existem passos importantes para proceder ao seu armazenamento e comercialização, muito ligado ao facto de à saída da prensa os *pellets* estarem a

uma temperatura muito elevada e conterem ainda partículas de dimensões reduzidas denominadas de “finos”.

Para que o processo de armazenamento seja bem-sucedido será importante satisfazer os seguintes requisitos:

FR_{3,1} – Arrefecer os *pellets*

FR_{3,2} – Remover os finos

FR_{3,3} – Ensacar os *pellets*

Não existe uma distinção entre o tipo de ensacamento pois por observação verificou-se que o sistema existente procede tanto ao ensacamento em *big bags* como em sacos de comercialização doméstica. Esta versatilidade irá ser abordada posteriormente nesta tese.

Uma vez definido o que deveria ser atingido por este sistema, foi observada a linha existente para enumerar os mecanismos empregues nesta fase do processo. Foram então definidos como “Parâmetros de Projeto”:

DP_{3,1} – Arrefecedor

DP_{3,2} – Crivo vibratório

DP_{3,3} – Sistema de ensacamento (Figura 5.7)

Uma vez definidos os “Requisitos Funcionais” e “Parâmetros de Projeto” deste subprocesso foi então elaborada a equação de projeto:

$$\begin{bmatrix} FR_{3,1} \\ FR_{3,2} \\ FR_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,1} \\ DP_{3,2} \\ DP_{3,3} \end{bmatrix} \quad [5.4]$$

Era expectável desde a definição dos FRs e DPs que este subprocesso fosse desacoplado visto que é composto por atividades sequenciais que nada têm a ver umas com as outras. Esta fase do processo está simplificada e de acordo com o Axioma da Independência da teoria axiomática de projeto.



Figura 5.7 - Mecanismo de ensacamento

5.2.4 DP₄ – Sistema de distribuição

Ao longo da linha de produção o material a ser trabalhado passa por várias fases, sendo que as suas dimensões e teor de humidade vão sofrendo alterações. Isto deve ser tido em conta

pois deve existir um sistema que proceda ao encaminhamento do material entre os vários processos. As exigências deste sistema vão estar relacionadas com as características do material a transportar, e por isso os FRs irão ser definidos de acordo com isto.

Assim sendo começa-se por seguir o material desde os passos iniciais. Na primeira fase do processo o material é a estilha, com dimensões na ordem do 3-10 cm e com teores de humidade a rondar os 50%.

FR_{4,1} – Armazenar estilha (Figura 5.8)

FR_{4,2} – Transportar estilha (3-10 cm / 50% humid.)



Figura 5.8 - Estilha

Esta estilha é posteriormente triturada, ficando com dimensões a rondar os 10-15 mm. Apesar do processo de moagem influenciar a humidade do material, é apenas residualmente, e por isso não irá ser considerada uma alteração no teor de humidade nos processos de moagem.

FR_{4,3} – Armazenar serrim (verde)

FR_{4,4} – Transportar serrim (verde) (10-15 mm/ 50% humid.)

O serrim passa por uma secagem, reduzindo drasticamente o seu teor de humidade. O resultado é um material com dimensões ligeiramente reduzidas (porém não será considerada esta diminuição, sendo apenas residual) e com um teor de humidade a rondar os 12%.

FR_{4,5} – Armazenar serrim (seco)

FR_{4,6} – Transportar serrim (seco) (10-15 mm/ 12% humid.)

O serrim é então triturado novamente para atingir as dimensões necessárias para a produção de *pellets* (4 mm).

FR_{4,7} – Armazenar matéria-prima final

FR_{4,8} – Transportar matéria-prima final (4 mm / 12% humid.)

Esta matéria-prima está pronta a ser transformada em *pellets*, e por isso é encaminhada para a prensa peletizadora. Da prensa são obtidos os *pellets* que também devem ser transportados e armazenados

FR_{4,9} – Armazenar *pellets*

FR_{4,10} – Transportar *pellets*

Chega-se então à conclusão de que existem quatro tipos de material a armazenar e transportar ao longo do processo, sendo que os equipamentos utilizados devem ter em consideração as propriedades do material a transportar.

Para definir os DPs foi então observada a linha, sendo que os mecanismos utilizados serão enumerados como tal.

DP_{4,1} – Silo de estilha (Figura 5.9)

DP_{4,2} – Transportador de correia

DP_{4,3} – Silo de serrim 1

DP_{4,4} – Transportador pneumático

DP_{4,5} – Silo de serrim 2

DP_{4,6} – Transportador de parafuso sem-fim

DP_{4,7} – Silo 3

DP_{4,8} – Transportador de parafuso sem-fim

DP_{4,9} – Silo de *pellets* (Figura 5.10)

DP_{4,10} – Transportador de correia

A razão pela qual existem mecanismos repetidos nesta enumeração, é que apesar de serem do mesmo tipo, fisicamente são equipamentos diferentes, que podem sofrer alterações consoante as necessidades do material que transportam.



Figura 5.9 - Silo de estilha



Figura 5.10 - Silo de pellets

Assim sendo, visto que para cada um dos “Requisitos Funcionais” é utilizado um mecanismo completamente diferente, naturalmente a matriz de processo nesta fase será desacoplada.

$$\begin{bmatrix} FR_{4,1} \\ FR_{4,2} \\ FR_{4,3} \\ FR_{4,4} \\ FR_{4,5} \\ FR_{4,6} \\ FR_{4,7} \\ FR_{4,8} \\ FR_{4,9} \\ FR_{4,10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{4,1} \\ DP_{4,2} \\ DP_{4,3} \\ DP_{4,4} \\ DP_{4,5} \\ DP_{4,6} \\ DP_{4,7} \\ DP_{4,8} \\ DP_{4,9} \\ DP_{4,10} \end{bmatrix} \quad [5.5]$$

5.2.5 DP₅ – Sistema de filtragem e reaproveitamento

Como enunciado anteriormente, os processos utilizados para a preparação da matéria-prima e a própria produção dos *pellets* podem produzir partículas de muito pequenas dimensões, que podem ser levadas nas condutas de escape. Se não for controlada, esta pode ser a fonte de um grande desperdício de material bem como de poluição.

Para que o sistema de filtragem seja adequado deverão ser analisados os processos que produzem mais pó.

O primeiro processo que claramente é responsável por levantamento de pó será a moagem. Tanto na de material húmido como de material seco, a ação dos martelos faz com que o material reduza drasticamente as suas dimensões, sendo que a produção de pó é elevada. Isto

associado ao facto de o transporte do material ser feito pneumaticamente faz com que seja de especial importância um sistema de filtragem de ar à saída dos moinhos, ficando assim definido o requisito funcional:

FR_{5,1} – Filtrar o ar à saída dos moinhos

A secagem é outro processo em que os gases de saída devem ser controlados. Uma vez que o ar quente que circula no secador é produzido pela combustão de madeira e pó de cortiça, e está diretamente em contacto com material a secar, à saída do secador está saturado de partículas de madeira e impurezas que não podem ser reaproveitadas. No entanto o escape para atmosfera é bastante prejudicial para o ambiente, e por isso, deve ser passado por um sistema de limpeza de ar.

FR_{5,2} – Filtrar o ar à saída do secador

Estes são os dois mecanismos que resultam em maior produção de resíduos que poderiam ser misturados com os gases de escape. Seguidamente foi analisada a linha de produção para perceber o que é feito para proceder a filtragem destes gases.

Após a saída do material dos moinhos, o sistema de transporte pneumático leva o material para uma estação de filtragem com duas fases, que procede à separação do material do ar, que irá ser apelidado de:

DP_{5,1} – Sistema de filtragem de ar (moinhos) (Figura 5.11)



Figura 5.11 - Sistema de filtragem de ar (moinhos)

Já à saída do secador, a maioria do material é separado do ar logo à partida devido à geometria da saída do secador (irá ser analisado posteriormente). O ar será encaminhado para um sistema de filtragem e limpeza que procede ao reaproveitamento de matéria-prima e depois à limpeza do ar antes de o libertar para a atmosfera.

DP_{5,2} – Estação de limpeza e filtragem de gases (Figura 5.12)



Figura 5.12 - Estação de limpeza de gases

Esta análise serviu apenas para perceber as funções dos mecanismos na linha, sendo que nesta fase a matriz de processo é do tipo desacoplada.

$$\begin{bmatrix} FR_{5,1} \\ FR_{5,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 \\ 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{5,1} \\ DP_{5,2} \end{bmatrix} \quad [5.6]$$

Mais uma vez deve-se ter em atenção que é ainda muito cedo na análise para inferir sobre a qualidade do projeto, sendo que até agora as matrizes desacopladas ainda são devidas à independência dos equipamentos. Esta fase da análise serve sobretudo para perceber o funcionamento dos equipamentos da linha como um todo, e não individualmente.

5.2.6 DP₆ – Sistema de deteção e extinção de incêndios

Por último nesta análise de segundo nível irá ser analisado o sistema de extinção da linha. Já foi explicada anteriormente a necessidade de um sistema que possa detetar e evitar o alastramento de fogos ou faíscas, visto que o material a ser processado é um excelente combustível.

A primeira fase neste sistema será sempre a deteção. Devem ser detetadas faíscas que possam dar-se no transporte de material. (Esta análise debruça-se apenas no sistema implementado pela empresa no exterior dos mecanismos de processamento). Por isso define-se:

FR_{6,1} – Detetar faíscas

Após a deteção dos estágios iniciais de um incêndio, é imperativo que estas sejam extintas logo à partida, sendo este também um requisito funcional.

FR_{6,2} – Humedecer material afetado

Por fim, este material deve ser retirado do normal trajeto da matéria-prima, tanto para desimpedir o caminho para a regularização da produção, como para prevenir que uma faísca ou chama que possa não ter sido extinta siga em frente na linha.

FR_{6,3} – Retirar o material da linha

Para que o sistema de extinção de incêndios seja eficiente deve atender a todas estes requisitos. Foi então analisado o sistema utilizado na empresa definindo os “Parâmetros de Projeto”.

A detecção de faíscas é feita com recurso a um único sensor. Já o material é humedecido com recurso a aspersores estrategicamente colocados.

DP_{6,1} – Sensor de faíscas (Figura 5.13)

DP_{6,2} – Aspersores (Figura 5.14)



Figura 5.13 - Sensor de faíscas



Figura 5.14 – Tubagem de água ligada aos aspersores

Já a remoção do material é feita com recurso a um sistema que abre a tubagem utilizada para transportar o material, empurra o material para fora (a remoção pode também ser feita por ação da gravidade dependendo do caso). No caso do material que sai do secador, visto que apresenta um teor de humidade muito baixo e pode ainda estar a temperaturas elevadas, este material cai para um transportador de correia que o leva até um depósito para que seja mais afastado da linha.

DP_{6,3} – Sistema de remoção de material

Estão assim definidos os “Parâmetros de Projeto”, podendo ser feita a matriz de processo:

$$\begin{bmatrix} FR_{6,1} \\ FR_{6,2} \\ FR_{6,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{6,1} \\ DP_{6,2} \\ DP_{6,3} \end{bmatrix} \quad [5.7]$$

Nesta fase o projeto apresenta uma matriz de projeto desacoplada. Isto deve-se sobretudo ao facto de cada um dos FR serem assegurados por equipamentos independentes entre si.

5.2.7 Análise de nível

Ao longo deste capítulo foram definidos os FRs e DPs de primeiro e segundo nível, pelo que é interessante observar como estão definidos nesta fase do projeto, isto irá possibilitar uma visualização da qualidade do projeto até agora.

Estão então definidos os requisitos de projeto da seguinte forma:

- FR₁ – Preparar a matéria-prima para a peletização
 - FR_{1,1} – Separar fragmentos com dimensões inferiores a 15mm
 - FR_{1,2} – Reduzir as dimensões do material para valores inferiores a 15 mm
 - FR_{1,3} - Reduzir o teor de humidade da matéria-prima para valor <12%
 - FR_{1,4} - Reduzir as dimensões do material para valores inferiores a 4 mm
- FR₂ – Peletizar o material
 - FR_{2,1} – Conferir aos *pellets* diâmetros entre 6 e 8 mm
 - FR_{2,2} – Conferir aos *pellets* comprimento entre 3,15 e 40 mm
 - FR_{2,3} – Conferir aos *pellets* a consistência necessária.
 - FR_{2,4} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{2,5} – Evitar a dispersão dos *pellets* à saída
 - FR_{2,6} – Atenuar as forças de atrito entre o material e a matriz
- FR₃ - Preparar os *pellets* para expedição;
 - FR_{3,1} – Arrefecer os *pellets*
 - FR_{3,2} – Remover os finos
 - FR_{3,3} – Ensacar os *pellets*
- FR₄ - Encaminhar o material entre processos
 - FR_{4,1} – Armazenar estilha
 - FR_{4,2} – Transportar estilha (3-10 cm / 50% humid.)
 - FR_{4,3} – Armazenar serrim (verde)
 - FR_{4,4} – Transportar serrim (verde) (10-15 mm/ 50% humid.)
 - FR_{4,5} – Armazenar serrim (seco)
 - FR_{4,6} – Transportar serrim (seco) (10-15 mm/ 12% humid.)
 - FR_{4,7} – Armazenar matéria-prima final
 - FR_{4,8} – Transportar matéria-prima final (4 mm / 12% humid.)
 - FR_{4,9} – Armazenar *pellets*
 - FR_{4,10} – Transportar *pellets*
- FR₅ - Filtrar ar
 - FR_{5,1} – Filtrar o ar à saída dos moinhos

- FR_{5,2} – Filtrar o ar à saída do secador
- FR₆ - Prevenir e extinguir incêndios
 - FR_{6,1} – Detetar faíscas
 - FR_{6,2} – Humedecer material afetado
 - FR_{6,3} – Retirar o material da linha

Também se podem enumerar os “Parâmetros de Projeto” da mesma forma:

- DP₁ – Sistema de preparação de matéria-prima
 - DP_{1,1} – Crivo rotativo
 - DP_{1,2} – Moinho de martelos (verdes)
 - DP_{1,3} – Secador de tambor rotativo
 - DP_{1,4} – Moinho de martelos (secos)
- DP₂ – Prensa peletizadora
 - DP_{2,1} – Matriz de peletização
 - DP_{2,2} – Pente de corte
 - DP_{2,3} – Rolos da prensa
 - DP_{2,4} – Sem-fim
 - DP_{2,6} – Jatos de vapor de água
- DP₃ – Sistema de pós-produção
 - DP_{3,1} – Arrefecedor
 - DP_{3,2} – Crivo vibratório
 - DP_{3,3} – Sistema de ensacamento
- DP₄ - Sistema de distribuição
 - DP_{4,1} – Silo de estilha
 - DP_{4,2} – Transportador de correia
 - DP_{4,3} – Silo de serrim 1
 - DP_{4,4} – Transportador pneumático
 - DP_{4,5} – Silo de serrim 2
 - DP_{4,6} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{4,7} – Silo 3
 - DP_{4,8} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{4,9} – Silo de *pellets*
 - DP_{4,10} – Transportador de correia
- DP₅ - Sistema de filtragem e reaproveitamento
 - DP_{5,1} – Sistema de filtragem de ar (moinhos)

- DP_{5,2} – Estação de limpeza e filtragem de ar
- DP₆ - Sistema de detecção e extinção de incêndios
 - DP_{6,1} – Sensor de faíscas
 - DP_{6,2} – Aspersores
 - DP_{6,3} – Sistema de remoção de material

Uma vez enumerados os FRs e DPs definidos neste nível, pode ser elaborada a matriz de projeto (Tabela 5.1) para visualizar as relações existentes.

Tabela 5.1 - Matriz de projeto

	DP ₁				DP ₂				DP ₃			DP ₄							DP ₅		DP ₆							
	1,1	1,2	1,3	1,4	2,1	2,2	2,3	2,4	2,6	3,1	3,2	3,3	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	4,10	5,1	5,2	6,1	6,2	6,3	
FR ₁	1,1	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,2	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,3	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,4	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR ₂	2,1	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,2	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,3	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,4	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,6	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR ₃	3,1	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	0	0
	3,2	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	0
	3,3	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
FR ₄	4,1	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
	4,2	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
	4,3	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
	4,4	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
	4,5	0	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
	4,6	0	0	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
	4,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
	4,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
	4,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
FR ₅	5,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
	5,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0
FR ₆	6,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0
	6,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	X	0
	6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X

Pode-se observar na Tabela 5.1 que nesta fase o projeto apresenta uma matriz do tipo acoplada, onde vários “Parâmetros de Projeto” vão influenciar “Requisitos Funcionais” para os quais não foram projetados. Dada a complexidade do processo, um projeto totalmente desacoplado é uma meta irrealista. Porém, um projeto desacoplável é alcançável se forem feitas algumas melhorias.

Uma das relações problemáticas nesta fase será entre o FR_{1,3} (Reduzir o teor de humidade da matéria-prima para valor <12%) e o DP_{2,6} (Jatos de vapor de água). A introdução de vapor de água na mistura à entrada da prensa peletizadora, da forma como é feita atualmente, pode levar a um aumento descontrolado do teor de humidade do material. Esta relação é problemática e irá ser abordada no capítulo referente às oportunidades de melhoria.

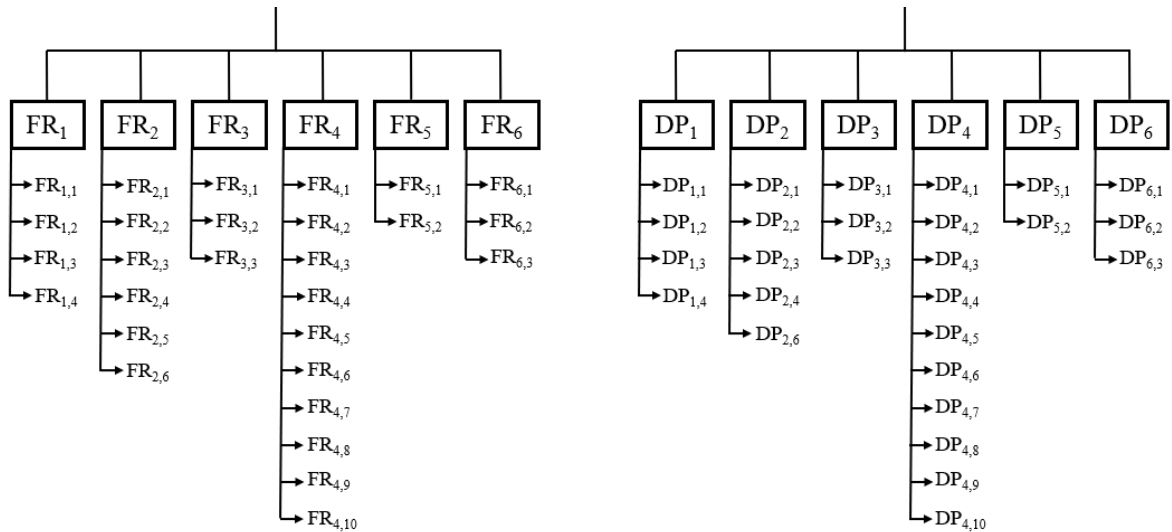


Figura 5.15 - Decomposição dos FRs e DPs

As melhorias serão vistas no próximo capítulo. Nesta fase chega-se a um conjunto de “Parâmetros de Projeto” que poderão ser utilizados para aprofundar a análise utilizando o procedimento em ziguezague.

5.3 Nível 3

No capítulo anterior foram definidos alguns DPs que ainda representam equipamentos ou sistemas passíveis de ser analisados de uma forma mais profunda. Por esta razão foi feita análise de terceiro nível, considerando apenas alguns DPs.

5.3.1 DP_{1,1} – Crivo rotativo

A matéria-prima que entra nesta fase é a estilha, que apresenta uma grande heterogeneidade de dimensões, sendo que os valores típicos serão entre 3 a 10 cm. Assim sendo é benéfico que seja feita uma separação para que o material de menores dimensões possa passar de forma imediata a fases mais avançadas de produção. Este processo é levado a cabo por um crivo rotativo (Figura 5.16).



Figura 5.16 - Crivo rotativo

Define-se então que a dimensão que servirá de limite será 3,5 mm de diâmetro. A razão para esta escolha é devida à comercialização direta de estilha com estas dimensões (apelidada de estilha crivada e representada na Figura 5.17), logo, a obtenção desta matéria-prima serve não só para evitar moagem desnecessária, mas também para a possível comercialização direta. Sendo assim está definido o primeiro FR deste parâmetro de projeto.

FR_{1,1,1} – Separar a estilha crivada (dimensões < 3,5 mm)



Figura 5.17 - Estilha crivada

É importante notar que o material nesta fase apresenta valores de humidade elevados, pelo que é normal que esteja aglomerado e que as partículas de menores dimensões não se separem das de maiores por consequência dessa aglomeração. Visto isto, é necessário que o crivo separe estes aglomerados para que a crivagem seja bem-sucedida, logo, define-se como FR:

FR_{1,1,2} – Separar aglomerados na matéria-prima

O equipamento utilizado para satisfazer estes requisitos é um crivo rotativo. Este mecanismo consiste numa matriz cilíndrica perfurada (Figura 5.18) consoante as necessidades da crivagem, os orifícios serão responsáveis pela separação da estilha, e por isso podem ser desde já definidos como o parâmetro de projeto.

DP_{1,1,1} – Orifícios da matriz cilíndrica



Figura 5.18 - Matriz cilíndrica (PRONAR Recycling, 2019)

Esta matriz cilíndrica irá conter o material no seu interior, sendo que passará para o exterior pelos orifícios, toda a matéria-prima que tenha dimensões inferiores ao estipulado. Porém a simples passagem pelo cilindro não seria suficiente para separar os aglomerados, por isso insere-se velocidade angular ao cilindro, existindo assim movimento rotativo, que forçará o material a misturar-se no interior do cilindro, e por ação dessa mistura os aglomerados irão ser desfeitos. É então assim definido o segundo DP.

DP_{1,1,2} – Velocidade angular do cilindro

Depois da separação do material é importante analisar a forma como este vai ser encaminhado para a saída do mecanismo. Os fragmentos de dimensões reduzidas irão passar pela malha do crivo e por ação da gravidade irão ser levadas para uma saída na zona inferior do crivo onde está um contentor. Já os fragmentos de maior dimensão ficam retidos no interior da matriz cilíndrica, sendo que será necessário proceder ao seu encaminhamento.

FR_{1,1,3} – Encaminhar o material longitudinalmente ao longo do cilindro

Este encaminhamento tem de ser feito de forma a não influenciar a boa crivagem do material, ou seja, o tempo que o material passará no interior deve ser adequado. A forma que foi encontrada para satisfazer o requisito foi utilizando a própria força de gravidade. O cilindro será inclinado, de forma a que o movimento circular associado à inclinação, mova o material não só tangencialmente às laterais do cilindro, mas também longitudinalmente.

DP_{1,1,3} – Inclinação do cilindro

Por fim, é ainda necessário retirar partículas metálicas que podem estar a contaminar a matéria-prima. Como já foi visto anteriormente a matéria-prima é armazenada no exterior, e muitas vezes podem existir contaminantes no chão (para além daqueles que podem vir diretamente do fornecedor). Fica assim definido mais um requisito funcional.

FR_{1,1,4} – Filtrar partículas metálicas

Esta filtragem é facilmente feita com recurso a um magneto permanente colocado à saída do equipamento.

DP_{1,1,4} – Magneto permanente

Todos estes parâmetros contribuem para o funcionamento do crivo rotativo utilizado nesta fase do processo. Funcionamento esse que está esquematizado na Figura 5.19.

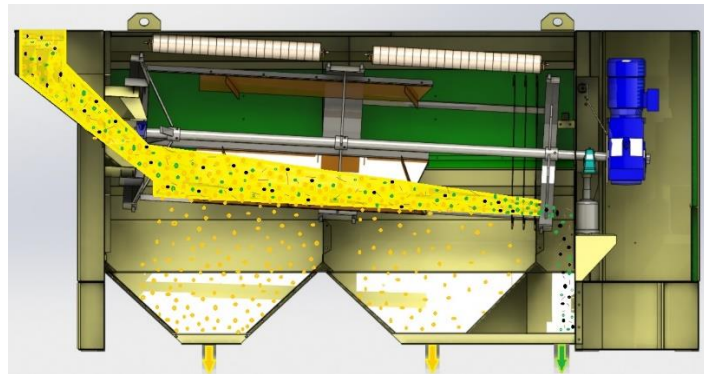


Figura 5.19 - Esquema de funcionamento do crivo rotativo (CFCAI, 2019)

Pode-se observar que o material de menores dimensões (representado a amarelo) cai pelas laterais do cilindro, enquanto que o material de maiores dimensões (representado a verde) atravessa o cilindro inteiro e cai na parte final do mecanismo. Na figura também se pode perceber a inclinação dada ao cilindro. Pode-se também observar a representação de um motor (a azul) que é responsável pelo movimento circular do cilindro.

Nesta fase resta então analisar as relações entre os FRs e DPs encontrados neste equipamento.

$$\begin{bmatrix} FR_{1,1,1} \\ FR_{1,1,2} \\ FR_{1,1,3} \\ FR_{1,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,1,1} \\ DP_{1,1,2} \\ DP_{1,1,3} \\ DP_{1,1,4} \end{bmatrix} \quad [5.8]$$

A matriz observada aparenta ser característica de um projeto acoplado, mas se for feita uma apropriada troca de linhas e colunas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} FR_{1,1,2} \\ FR_{1,1,1} \\ FR_{1,1,3} \\ FR_{1,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ \times & \times & 0 & 0 \\ \times & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,1,2} \\ DP_{1,1,1} \\ DP_{1,1,3} \\ DP_{1,1,4} \end{bmatrix} \quad [5.9]$$

Esta manipulação é muito interessante, pois chega-se a um projeto desacoplável, o que por definição, nos incentiva a projetar os “Parâmetros de Projeto” com uma dada ordem, otimizando cada parâmetro de projeto sequencialmente.

Neste caso será importante começar o projeto pela definição da velocidade angular necessária para que a desaglomeração se dê satisfatoriamente. Após esta definição, e tendo em conta a velocidade, define-se a dimensão dos orifícios da matriz circular. Por fim, e também considerando a velocidade definida no $DP_{1,1,2}$, define-se a inclinação que o cilindro deve ter para que o material o percorra de uma ponta à outra, no tempo correto para que a crivagem seja bem feita. A colocação do magneto permanente não apresenta correlação com os outros requisitos ou parâmetros, e por isso pode ser feita em qualquer altura sem afetar a otimização do projeto.

Esta é a análise ao equipamento que existe na linha de produção, que se mostra como um projeto desacoplável, que sendo bastante bom, ainda se distancia do ideal – um projeto desacoplado. Em termos práticos, não será viável alterar este equipamento, visto que não apresenta problemas, porém, para fins académicos, é interessante perceber se poderia ser utilizado qualquer outro mecanismo (real ou projetado) para que a matriz de projeto deste nível possa ser completamente desacoplada.

5.3.2 $DP_{1,2}$ – Moinho de martelos (verdes)

Nesta fase do processo, o material foi separado consoante as suas dimensões, sendo que os maiores fragmentos são encaminhados para a primeira moagem do processo.

Esta moagem é levada a cabo por um moinho de martelos, porém, para que a moagem seja feita corretamente o sistema deve suprir algumas necessidades que irão ser vistas a seguir.

Começando pela queda de material na zona superior da Figura 5.20. O moinho a utilizar tem uma câmara de moagem com espaço limitado, e para que a moagem seja feita corretamente nunca deve estar com excesso nem falta de material. Pode-se então observar que o caudal de material a entrar no moinho é um ponto importante a controlar. Fica então definido o primeiro requisito funcional.

FR_{1,2,1} – Regularizar o caudal de material à entrada



Figura 5.20 - Moinho de martelos

De seguida deve zelar-se pela integridade do equipamento. Foi antes falado de contaminantes na matéria-prima, porém nesta fase só foi feita a filtragem de componentes metálicos, e para garantir que não existe qualquer contaminação, esta filtragem deve ser feita novamente. Existe também o risco de o material conter pedras que poderão danificar os martelos e outros componentes do moinho, por isso será necessário filtrar estes contaminantes.

FR_{1,2,2} – Separar componentes metálicos

FR_{1,2,3} – Separar pedras

Uma vez regularizado o caudal de material e separados os contaminantes (pedras), este pode entrar na câmara de moagem. Nesta fase existem 2 equipamentos encarregues da correta redução de dimensões. A necessidade mais básica será a de triturar o material.

FR_{1,2,4} – Triturar a matéria-prima

Com o material triturado será necessário que os fragmentos com dimensões adequadas sejam libertados.

FR_{1,2,5} – Libertar partículas com dimensões < 15 mm

Estes são os requisitos que devem ser cumpridos para o bom funcionamento de um moinho de trituração. De seguida analisou-se o moinho existente para perceber como são respondidos cada um dos requisitos.

Iniciando a análise pelo FR_{1,2,1}, a regularização do caudal de material é feita com recurso a um transportador “sem-fim” ligado a um regulador de frequência. O material cai numa zona do transportador e é levado de forma contínua para a entrada do moinho consoante a necessidade. É importante que exista um regulador de frequência no motor ligado ao sem-fim, porque desta forma pode ser controlado o caudal de forma simples, sendo feito um controlo consoante o material a utilizar.

DP_{1,2,1} – Transportador de parafuso sem-fim (Figura 5.21)



Figura 5.21 - Transportador de parafuso sem-fim

De seguida é necessário fazer a filtragem das pedras e dos componentes metálicos que podem estar a contaminar a matéria-prima. Para estes efeitos são utilizados um magneto permanente e um mecanismo denominado de *stone trap*.

DP_{1,2,2} – Magneto permanente

DP_{1,2,3} – Stone Trap

O *stone trap* é um mecanismo essencial nesta fase do processo e o seu funcionamento é simples pelo que vai ser abordado ainda neste subcapítulo.

Para perceber o funcionamento do *stone trap* é benéfico observar um esquema da entrada do moinho, que está representado na Figura 5.22.

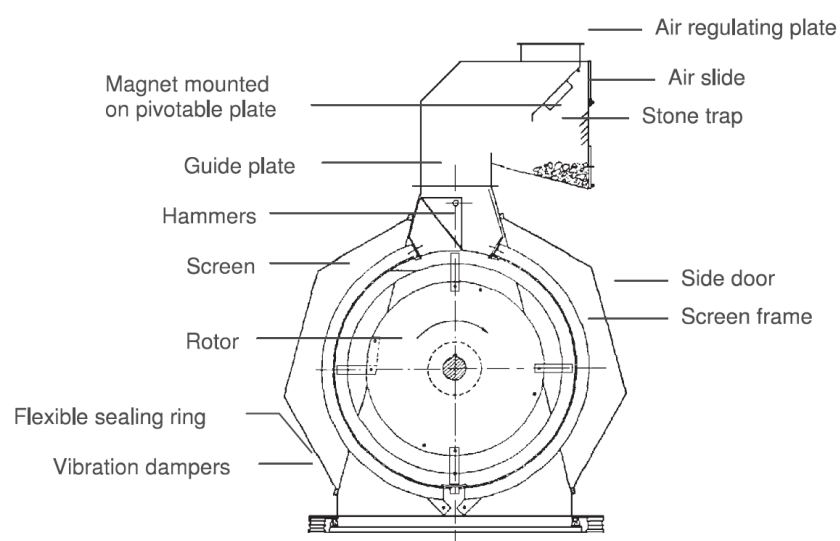


Figura 5.22 - Esquema de um moinho para madeira

Na zona superior da figura pode ser observada uma placa que contém o magneto permanente, após esta placa existe uma queda imediata para um reservatório de contaminantes, estando a entrada para a câmara de trituração mais afastada, o que ocorre é que os fragmentos de madeira leves são facilmente levados até à entrada do moinho por intermédio de um fluxo de ar proveniente da zona denominada “*air slide*”.

As partículas mais pesadas (pedras) caem por ação da gravidade para o reservatório pois a ação do fluxo de ar não é suficiente para as levar até à entrada. Este reservatório tem uma porta para descarga dos contaminantes periodicamente. Esta geometria característica é apelidada de *stone trap*.

Os dois FRs seguintes referentes à trituração e separação de partículas são assegurados por DPs que atuam dentro de uma câmara de trituração (Figura 5.24). O funcionamento do moinho e o interior desta câmara pode ser visto na Figura 5.23.



Figura 5.23 - Funcionamento de um moinho de martelos (BulkInside, 2019)

Pode então observar-se que o material entra por cima, sendo encaminhado para uma câmara de trituração (Figura 5.24), onde um conjunto de martelos se encontram em constante movimento circular. O impacto entre o material, as paredes da câmara e os martelos é responsável pela trituração do material.

DP_{1,2,4} – Martelos



Figura 5.24 - Câmara de trituração

Uma vez feita a trituração do material deve-se garantir a separação das partículas com dimensões abaixo dos 15 mm. A forma como esta separação acontece é similar ao funcionamento do crivo rotativo analisado no subcapítulo anterior. As paredes da câmara de trituração são formadas por uma matriz cilíndrica perfurada (apelidada de tela) com furos com 15 mm de diâmetro.

As partículas já trituradas que tenham dimensões menores aos furos da tela são então libertados, enquanto que as restantes irão permanecer na câmara de trituração até serem convenientemente trituradas.

DP_{1,2,5} – Tela

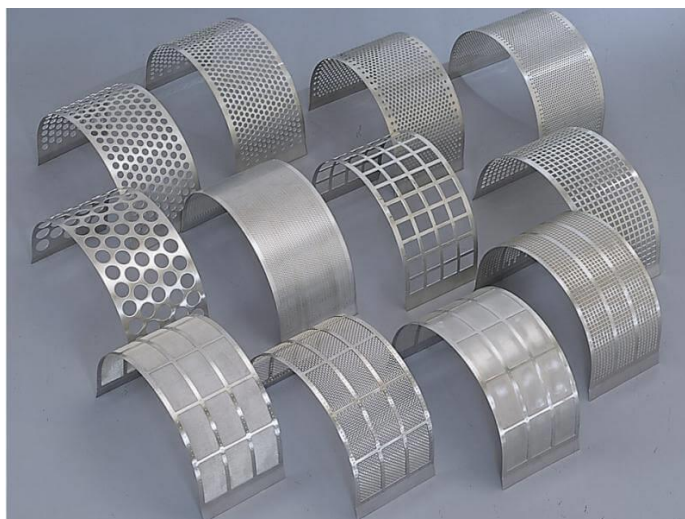


Figura 5.25 - Exemplos de telas de moinhos (911 Metallurgist., 2019)

Estão então definidos todos os DPs necessários para responder a cada um dos FRs A respetiva equação de projeto é:

$$\begin{bmatrix} FR_{1,2,1} \\ FR_{1,2,2} \\ FR_{1,2,3} \\ FR_{1,2,4} \\ FR_{1,2,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,2,1} \\ DP_{1,2,2} \\ DP_{1,2,3} \\ DP_{1,2,4} \\ DP_{1,2,5} \end{bmatrix} \quad [5.10]$$

A única relação indesejável observada neste equipamento é relativa ao papel que a tela representa na trituração do material. O facto de esta ter de suportar o impacto dos fragmentos e consequentemente ser em parte responsável pela trituração dos mesmos representa um acoplamento do projeto. Isto leva a que tela deva ser projetada de forma a suportar o impacto de fragmentos de madeira, ao invés de apenas proceder à sua separação.

Existe outro moinho da linha de produção, utilizado para a trituração do material já seco. O projeto deste moinho de secos é muito semelhante ao visto neste subcapítulo e por isso não será analisado posteriormente. A única diferença é a inexistência do *stone trap*, pois já não existe necessidade de separar pedras nessa fase da produção.

5.3.3 DP_{1,3} - Secador de tambor rotativo

O secador (Figura 5.26) é um ponto fundamental do processo, para além de ser o *bottleneck* da produção, é também o equipamento que mais energia consome, tanto elétrica como calorífica. Por estas razões este vai ter uma análise ainda mais aprofundada ao seu funcionamento bem como a processos alternativos existentes na indústria.



Figura 5.26 - Secador de tambor rotativo

A necessidade de reduzir o teor de humidade do material é importantíssima para a produção de *pellets* de qualidade. Os equipamentos mais comuns são os secadores de leito fluidizado, os secadores pneumáticos e os secadores de tambor rotativo, sendo que o último é o mais frequente na secagem de madeira e também o utilizado na empresa.

A secagem do material é feita por ação de um fluxo de ar quente que entra em contacto com a matéria-prima no interior do secador. O simples contacto do fluxo de ar quente com a matéria-prima consegue reduzir o teor de humidade da mesma, porém não a níveis aceitáveis para a produção de *pellets*. Por esta razão devem ser considerados “Requisitos Funcionais” que garantam a redução adequada do teor de humidade.

Para que o secador tenha um bom desempenho deve-se garantir que é fornecido um caudal de ar quente de acordo com a necessidade de secagem.

FR_{1,3,1} – Fornecer o caudal necessário de ar ao secador

Também terá de ser considerada a temperatura deste fluxo de ar:

FR_{1,3,2} – Fornecer temperatura ao fluxo de ar

Uma vez considerada a temperatura e o caudal do fluxo de ar, as atenções devem focar-se no “corpo” do secador. Inicialmente o requisito óbvio será garantir que o material se desloque no interior do secador.

FR_{1,3,3} – Movimentar o material

É também importante garantir que o material tenha uma redução de humidade homogénea, eliminando a possibilidade de aglomerados de matéria-prima apresentarem teores de humidade muito diferentes do restante material, situação que poria em causa a qualidade dos *pellets*.

FR_{1,3,4} – Garantir a homogeneidade da secagem

Estes são os requisitos básicos que um sistema de secagem deve garantir. De seguida será visto como o secador de tambor rotativo presente na linha atual cumpre estes requisitos.

Iniciando a análise pelo primeiro requisito funcional, o caudal é assegurado tipicamente por um ventilador.

DP_{1,3,1} – Ventilador

A temperatura fornecida ao fluxo de ar é assegurada através de uma fornalha cujo funcionamento será posteriormente analisado com maior detalhe.

DP_{1,3,2} – Fornalha

O movimento do material é feito com recurso ao fluxo de ar, que se desloca no mesmo sentido do fluxo de material, fazendo com que os fragmentos de madeira de tamanho reduzido (uma das razões pela qual a moagem a verde é importante) se desloquem. Observa-se então que o $DP_{1,3,1}$ satisfaz simultaneamente o $FR_{1,3,1}$ e o $FR_{1,3,3}$.

Para garantir a homogeneidade da secagem, o secador tem um movimento rotativo, associado à sua forma cilíndrica e a pequenas saliências no seu interior, que fazem com que o material se movimente de diferentes formas consoante a rotação do secador, assim sendo assume-se 2 DPs nesta fase, a estrutura do secador e o movimento de rotação

DP_{1,3,3} – Movimento de rotação

DP_{1,3,4} – Estrutura do secador

Nesta fase não se detalharam os pormenores de construção da estrutura do secador, para que esta análise seja feita de forma individual, pois é algo de grande interesse e detalhe, e que merece uma análise cuidada e profunda.

Por último, deve ser considerado um DP referente à intervenção dos operadores. Mediante análises periódicas de teor de humidade do material à saída do secador, os operadores podem alterar os parâmetros de secagem vistos até agora (nomeadamente o caudal e a temperatura do fluxo de ar e a velocidade de rotação do tambor).

DP_{1,3,5} – Intervenção de operadores

Finalmente, pode-se elaborar a equação de projeto deste nível de análise:

$$\begin{bmatrix} FR_{1,3,1} \\ FR_{1,3,2} \\ FR_{1,3,3} \\ FR_{1,3,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ \times & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,3,1} \\ DP_{1,3,2} \\ DP_{1,3,3} \\ DP_{1,3,4} \\ DP_{1,3,5} \end{bmatrix} \quad [5.11]$$

O aspeto da equação demonstra a necessidade de alterar a ordem dos FRs e DPs para obter uma matriz triangular característica de um projeto desacoplável.

$$\begin{bmatrix} FR_{1,3,5} \\ FR_{1,3,4} \\ FR_{1,3,2} \\ FR_{1,3,1} \\ FR_{1,3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ \times & 0 & \times & 0 & 0 \\ \times & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,3,5} \\ DP_{1,3,4} \\ DP_{1,3,2} \\ DP_{1,3,1} \\ DP_{1,3,3} \end{bmatrix} \quad [5.12]$$

O projeto do secador demonstra ser redundante e desacoplável (visto que a matriz é trapezoidal), sendo que o DP referente à intervenção dos operadores se relaciona com quase todos os requisitos de projeto. Isto é devido à falta de automatização deste processo.

Neste momento, o processo de secagem feito na empresa é feito com base em análises periódicas do teor de humidade do material à saída do secador. Estas análises são feitas manualmente em períodos de cerca de 2 horas, ou seja, não existe uma leitura em tempo real do teor de humidade do material à saída do secador.

O facto de não existir uma leitura em tempo real do teor de humidade faz com que o processo se baseie apenas na experiência dos operadores, que ajustam o caudal e a temperatura do fluxo de ar, bem como a velocidade de rotação do tambor, de acordo com a última análise ao teor de humidade.

O processo de secagem representa o *bottleneck* da produção, e o facto de depender fortemente da experiência dos operadores pode causar problemas de produtividade, por essa razão, é interessante projetar este equipamento de forma a que a intervenção dos operadores seja mais reduzida, automatizando o processo.

Esta automatização terá como principal alteração a introdução de um sistema de leitura do teor de humidade em tempo real, e será abordada no próximo capítulo.

5.3.4 DP_{3,1} – Arrefecedor

A obtenção dos *pellets* é um processo que gera grandes quantidades de calor devido à aglomeração forçada do material triturado e das características abrasivas do mesmo. Por isso quando os *pellets* são obtidos têm uma temperatura muito elevada.

Esta temperatura pode causar problemas nos equipamentos seguintes tais como a crivagem e o próprio ensacamento. Por isso é imperativo que a temperatura seja reduzida antes dos *pellets* procederem para os processos seguintes.

Para este arrefecimento é utilizado um equipamento específico – o arrefecedor (Figura 5.27) - por isso serão definidos os “Requisitos Funcionais” de um modo geral e depois analisada a forma como o mecanismo responde a estes requisitos.



Figura 5.27 - Arrefecedor de *pellets* (AZEUS, 2019)

O primeiro será obviamente a necessidade de reduzir a temperatura dos *pellets*.

FR_{3,1,1} - Reduzir a temperatura dos *pellets*

Para que o arrefecimento seja feito da melhor forma os *pellets* devem ser armazenados corretamente.

FR_{3,1,2} - Armazenar os *pellets*

Por fim, o tempo de arrefecimento deve ser controlado para que não existam atrasos desnecessários.

FR_{3,1,3} - Adequar o tempo de arrefecimento

Ficam assim estabelecidos os requisitos que o mecanismo de arrefecimento deve cumprir. Para perceber como estes requisitos são cumpridos é interessante analisar o esquema da Figura 5.28.

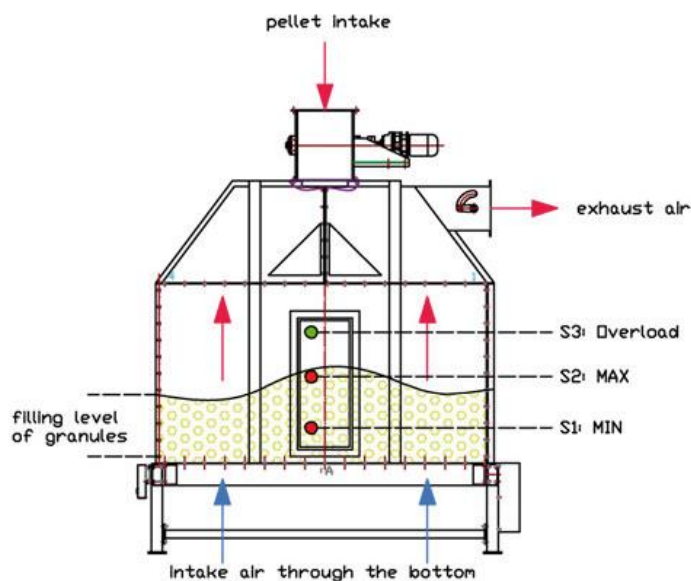


Figura 5.28 - Esquema de funcionamento de um arrefecedor de *pellets* (AZEUS, 2019)

Observando o esquema pode-se observar que o arrefecimento dos *pellets* se dá por ação de um fluxo de ar frio que entra pela zona inferior do arrefecedor, por isso pode ser definido com o primeiro parâmetro de projeto.

DP_{3,1,1} - Fluxo de ar frio

Os pellets são armazenados na estrutura do arrefecedor, que se assemelha a um silo, porém a zona inferior terá de ser adaptada. Uma vez que um fluxo de ar frio terá de passar por entre os pellets, e a zona inferior do arrefecedor é o local de entrada do fluxo, esta superfície deve ter características que permitam simultaneamente a passagem do ar e a acumulação dos pellets.

DP_{3,1,2} – Estrutura do arrefecedor

Por fim analisou-se como é feita a adequação do tempo de arrefecimento. Por observação do funcionamento e contacto com os operadores, chegou-se à conclusão de que existem sensores nas paredes do arrefecedor que estão ligados a uma válvula de saída na zona inferior. Estes sensores são acionados quando os pellets são acumulados até uma determinada altura, acionando a válvula de saída. A válvula de saída abre e os *pellets*, por ação da gravidade, são removidos do interior do arrefecedor.

DP_{3,1,3} – Sistema sensor/válvula

Uma vez definidos os FRs e DPs deste mecanismo pode-se elaborar a equação de projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{3,1,1} \\ FR_{3,1,2} \\ FR_{3,1,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,1,1} \\ DP_{3,1,2} \\ DP_{3,1,3} \end{bmatrix} \quad [5.13]$$

O projeto é caracterizado como desacoplável por apresentar uma equação do tipo triangular superior. O facto de a saída dos *pellets* ser efetuada pela zona inferior do arrefecedor, que faz parte da estrutura responsável pelo armazenamento, faz com que o projeto não seja completamente desacoplado.

Uma possibilidade de melhoria deste equipamento seria alterar o projeto de forma a que a saída dos pellets fosse feita de outra forma, de maneira a que o armazenamento não fosse posto em causa no caso de um mau funcionamento da válvula de saída.

5.3.5 DP_{3,2} – Crivo vibratório

Uma vez obtidos os *pellets* e devidamente arrefecidos é importante que se proceda à eliminação de fragmentos de menores dimensões que possam contaminar os *pellets*. Estes fragmentos podem surgir devido ao transporte ou queda do material entre processos.

Esta eliminação é importante pois o produto com que se está a trabalhar é um combustível, como tal, se no ensacamento estão presentes resíduos de pequenas dimensões, a eficiência energética vai ser afetada, principalmente pelo método de alimentação típico das salamandras a *pellets*.

Na indústria, aos resíduos de pequenas dimensões que são filtrados nesta fase do processo dá-se o nome de "finos", sendo que a percentagem destes contribui para a avaliação da qualidade dos *pellets* (ENPlus).

Esta eliminação dos finos ocorre imediatamente antes do ensacamento, recorrendo a um crivo vibratório, cujo funcionamento será detalhado seguidamente.

Devido às características do material e às pequenas dimensões dos finos, é natural que se formem aglomerados de finos com *pellets*, o que torna a separação mais problemática, por este motivo o primeiro requisito funcional será separar estes aglomerados.

FR_{3,2,1} - Separar aglomerados de finos dos *pellets*

De seguida, uma vez separados estes aglomerados, deve existir forma de fazer com que os *pellets* sejam encaminhados para ensacamento enquanto que os finos ficam retidos nesta fase.

FR_{3,2,2} - Encaminhar os dois materiais separadamente

Estes são os dois “Requisitos Funcionais” essenciais para a separação dos finos. Seguidamente foi feita uma análise ao crivo utilizado para perceber o seu funcionamento e talvez encontrar novos Requisitos Funcionais, bem como os “Parâmetros de Projeto” existentes.

O funcionamento deste tipo de crivos está representado na Figura 5.29, com a diferença que o utilizado na empresa tem uma certa inclinação.

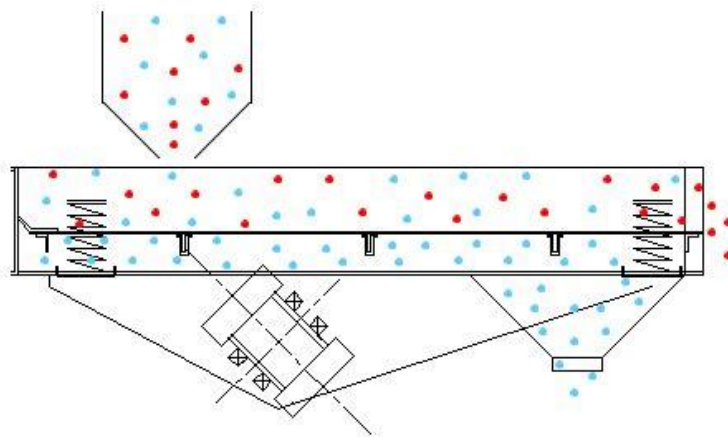


Figura 5.29 - Funcionamento de um crivo vibratório linear (YinXing, 2019)

Como se pode observar, os *pellets* (representados a vermelho) juntamente com os finos (representados a azul) são depositados na parte superior do crivo. Para responder ao primeiro requisito funcional, a separação dos finos dos *pellets*, o crivo tem um movimento vibratório, que faz com que os aglomerados se quebrem, ficando assim encontrado o primeiro parâmetro de projeto.

DP_{3,2,1} – Movimento vibratório

Para que o encaminhamento seja diferenciado, o crivo tem uma plataforma (onde o material é depositado) que é perfurada, tendo os furos o diâmetro adequado à passagem dos finos, mas à retenção dos *pellets*.

DP_{3,2,2} - Plataforma perfurada

Nesta fase a separação dos materiais já é assegurada, no entanto o movimento longitudinal do material ainda não foi considerado, e por isso deve ser abordado com requisito funcional.

FR_{3,2,3} - Movimentar o material ao longo do crivo

No esquema da Figura 5.29 este movimento será, previsivelmente, apenas assegurado pela vibração do crivo, o que, em termos axiomáticos, é uma solução pobre, que com certeza levará a um projeto acoplado devido à insuficiência de DPs. Porém o equipamento utilizado na empresa

tem uma pequena diferença, mas que em muito influencia o bom funcionamento: a inclinação do crivo.

DP_{3,2,3} - Inclinação

Ao proceder à inclinação do sistema, a movimentação do material longitudinalmente é assegurada pela ação da gravidade.

Uma vez obtidos os FRs e DPs deste nível é elaborada então a equação de projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{3,2,1} \\ FR_{3,2,2} \\ FR_{3,2,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ \times & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,2,1} \\ DP_{3,2,2} \\ DP_{3,2,3} \end{bmatrix} \quad [5.14]$$

A matriz é própria de um projeto desacoplável, sendo que o único caso em que a total independência não é assegurada é relativo à influência que a vibração do crivo terá na deslocação do material. Devido a esta relação a inclinação do crivo terá de ser ajustada consoante a vibração do crivo, devido à ordem imposta na equação de projeto.

5.3.6 DP_{3,3} – Sistema de ensacamento

O processo final da linha de produção é o ensacamento dos *pellets*, consoante o cliente para o qual determinado lote foi produzido. Tendo isto em consideração existem dois tipos de ensacamento possível:

- *Big Bags* (1000 kg) – Tipicamente utilizados para armazenamento em fábrica ou para clientes industriais
- Sacos de 15 kg – Sacos de uso doméstico

Dada a diferença de dimensão e de peso dos diferentes tipos de embalagem, faz sentido que os “Requisitos Funcionais” deste nível diferenciem o tipo de ensacamento a fazer

FR_{3,3,1} – Ensacar os *pellets* em *Big Bags*

FR_{3,3,2} – Ensacar os *pellets* em sacos de 15 kg

Para garantir a independência e o conseqüente bom funcionamento deste processo final, faz sentido que os equipamentos que procedem ao ensacamento sejam diferenciados para garantir uma maior produtividade nos processos.

DP_{3,3,1} – Mecanismo de ensacamento em *Big Bags* (Figura 5.30)

DP_{3,3,2} – Mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg (Figura 5.31)



Figura 5.30 - Mecanismo de ensacamento em *Big Bags*



Figura 5.31 - Mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg

Como é de esperar pela análise anterior, este sistema apresenta uma matriz de processo desacoplada, uma vez que todos os “Requisitos Funcionais” são atingidos utilizando mecanismos independentes entre si.

5.3.7 DP_{4,1} – Silo de estilha

Quando se analisa uma linha de produção, os processos que afetam as características do material ganham grande protagonismo, contudo devem ser consideradas as alturas em que o material deva ser armazenado entre processos.

Visto que cada um dos equipamentos tem um certo nível de *input* que pode processar, é obvio que entre processos o fluxo do material não deverá ser contínuo e linear, com igual caudal para a saída de um mecanismo e entrada do seguinte. Por exemplo, o material à saída da moagem a verde tem um caudal elevado, porém a secagem do material (processo imediatamente posterior à moagem a verde) tem um nível de *input* que deve ser cuidadosamente vigiado. Isto demonstra a impossibilidade de proceder à distribuição do material apenas utilizando transportadores, é necessário que haja equipamentos que armazenem o material entre processos (Figura 5.32).



Figura 5.32 - Silo de estilha

Visto isto, o primeiro equipamento deste tipo será imediatamente à entrada da linha. A principal matéria-prima utilizada é a estilha, que iniciará o processo na crivagem como visto anteriormente, porém, é inconcebível que a alimentação da linha seja feita de forma manual, por isso deve ser considerado um equipamento que não só armazene a matéria-prima, como também proceda a alimentação da linha consoante as necessidades do momento de produção.

Assim, podem-se definir os seguintes Requisitos Funcionais:

FR_{4,1,1} - Armazenar a estilha

FR_{4,1,2} - Alimentar a linha de produção

O armazenamento da estilha envolve algum raciocínio adicional, devido às características do material e à necessidade da linha de produção, pelo que a estrutura do silo, sendo o primeiro parâmetro de projeto deste nível, ainda deve ser analisado posteriormente.

DP_{4,1,1} – Estrutura do silo

Quanto à alimentação do material para a linha de produção, é feita com recurso a um sistema de plataformas situadas na base do silo, ligadas a cilindros hidráulicos de atuação linear que procedem à deslocação do material para um transportador que alimenta a linha de produção, os motores e atuadores podem ser observados nas Figura 5.33 e Figura 5.34.



Figura 5.33 – Centrais energéticas hidráulicas



Figura 5.34 - Atuadores lineares dos silos

DP_{4,1,2} – Sistema de alimentação

Ainda referente ao sistema de alimentação, é interessante analisar o formato das plataformas, que estão representadas na Figura 5.35. Estas são constituídas por tubos metálicos que formam uma estrutura retangular, assim o material poderá ser arrastado e cai na zona de saída do silo como se pode observar na figura abaixo.



Figura 5.35 - Plataforma de alimentação

Existem 3 plataformas em cada silo, cujo movimento é controlado por um operador na sala de controlo. Este operador será responsável por regular o caudal de saída consoante as necessidades da linha em dada altura.

Os silos 1, 2 e 3 (de serrim em vários estados) têm um projeto semelhante neste nível da análise. A diferenciação será feita quanto ao DP referente à sua estrutura, que será abordado posteriormente.

O silo de *pellets* é demasiado simples para ser abordado num subcapítulo inteiro, sendo que é só interessante apontar a geometria da superfície inferior do silo, feita em “V”.

Esta geometria é utilizada pois facilita a saída dos pellets para um transportador de correia situado abaixo do silo. Ao adotar uma superfície inferior em “V” fará com que os pellets sejam

sempre encaminhados para a saída por ação da gravidade, não existindo acumulações indesejadas. Esta geometria do fundo, bem como o transportador referido podem ser observados na Figura 5.36.



Figura 5.36 - Zona inferior do silo de pellets

5.3.8 DP_{4,2} – Transportador de correia.

Dada a necessidade de transporte, são utilizados na linha diferentes tipos de transportador, sendo que o primeiro a ser analisado nesta tese será o de correia. O princípio de funcionamento deste tipo de transportador é simples, porém deve ser adaptado às necessidades do material e dos processos.

Os elevadores de material serão analisados neste capítulo também, pois apesar de serem um equipamento ligeiramente diferente, o seu funcionamento difere sobretudo na verticalidade do transportador

A primeira necessidade de um transportador será movimentar o material, logo:

FR_{4,2,1} – Movimentar o material

Para este movimento, neste tipo de transportador, como o próprio nome indica, é utilizada uma correia, que poderá ter saliências que facilitam o transporte do material – Figura 5.37

DP_{4,2,1} – Correia transportadora



Figura 5.37 - Correia transportadora

As saliências que podem ser observadas na figura acima têm como objetivo evitar a queda de material pelos lados, visto que a deposição na correia muitas vezes é feita em queda, e ao chocar com a correia o material pode ser projetado em muitas direções, podendo existir desperdício. Já as saliências ao longo da largura da correia servem para garantir um fluxo constante de material, pois este tende a deslizar sobre si mesmo e até na correia (se o ângulo de talude for ultrapassado). As saliências evitam este deslize e garantem um fluxo contínuo para o próximo estágio de produção. Estas saliências também serão importantes para casos de inclinação, como será visto seguidamente.

Uma vez analisado o projeto da correia deve-se ter em consideração o seu movimento.

FR_{4,2,2} – Movimentar a correia

Para proceder ao movimento da correia é utilizado um sistema de rolos, os quais devem garantir a tensão adequada da correia, bem como o seu movimento.

DP_{4,2,2} – Sistema de rolos

Na Figura 5.38 podem ser observados os rolos que garantem a tensão correta da correia.

Por último deve ser considerada a altura da saída e da entrada de material dos processos. A definição dos transportadores é feita muitas vezes na fase final da conceção da fábrica, e isto pode levar a alguns problemas, pois por vezes, a inclinação necessária para o transportador é um entrave ao seu bom funcionamento. Contudo existe a necessidade de adequar a altura da saída de material.



Figura 5.38 - Transportador inclinado

FR_{4,2,3} – Adequar a altura da saída de material

Esta altura será garantida pela inclinação do sistema de transporte. Esta é uma das características mais aliantes a utilização de transportadores de correia e elevadores.

A capacidade de inclinação mais versátil do que por exemplo um transportador sem fim, sem a necessidade do isolamento e controlo de fluxo de um sistema pneumático torna um transportador de correia um equipamento de simples instalação e manutenção.

DP_{4,2,3} – Inclinação do transportador

Os elevadores de material (Figura 5.39), denominadas “noras” são ligeiramente diferentes dos típicos transportadores de correia tradicionais, principalmente por serem completamente fechadas, pois a elevação de material leva a movimento irregular do mesmo, sendo garantido que feito a descoberto iria causar quedas de material descontroladas bem como levantamento de grandes quantidades de pó. Porém, para efeitos de análise estes elevadores serão analisados em conjunto com os transportadores de correia, visto que o seu princípio de funcionamento é muito semelhante.

Já nesta fase será interessante analisar a equação de projeto para perceber como é que os “Parâmetros de Projeto” deste nível se relacionam com os Requisitos Funcionais.

$$\begin{bmatrix} FR_{4,2,1} \\ FR_{4,2,2} \\ FR_{4,2,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ \times & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{4,2,1} \\ DP_{4,2,2} \\ DP_{4,2,3} \end{bmatrix} \quad [5.15]$$

Pode-se concluir que se trata de um projeto desacoplável, dado que a escolha ou projeto da correia deve ter em conta o material a transportar e a adequação à altura do transporte.

A altura a que deve ser elevado o material utilizando transportadores de correia é uma variável muito importante no projeto da linha de produção. A inclinação deste tipo de transportadores não deve ultrapassar os 45° para o transporte de madeira (dados obtidos empiricamente), por isso o comprimento dos transportadores pode ser problemático.

Utilizando um exemplo real, o moinho de trituração de verdes tem cerca de 5 metros. Já o material proveniente do crivo rotativo está a cerca de 1,1 metros do chão à saída do mesmo.



Figura 5.39 - Elevador de material

Assumindo uma inclinação de 45°, o comprimento do transportador será de aproximadamente 5,5 metros.

Uma vez que nesta fase do processo o material apresenta dimensões elevadas e heterogêneas, a utilização de um elevador é inviável, e terá de ser utilizado um transportador de correia inclinado. No entanto para fases da produção posteriores será sempre recomendável utilizar elevadores verticais, pois levam a uma linha de produção mais compacta, resultando numa melhor ocupação do espaço disponível.

5.3.9 DP_{4,6} – Transportador de parafuso sem-fim

O último dos transportadores a ser analisado é talvez o mais utilizado na linha, isto porque qualquer material é facilmente transportado desta forma e sem haver desperdício. O tipo de transportador é o sem-fim.

O primeiro requisito funcional de qualquer transportador será o próprio movimento do material:

FR_{4,6,1} – Movimentar o material

O movimento do material é feito pela rotação de um parafuso helicoidal com passo de grande dimensão (com eixo central (Figura 5.41), ou sem eixo (Figura 5.40)). Esta forma de movimentar o material é bastante versátil, sendo que ao contrário dos outros tipos de transportador, consegue transportar material que apresente um valor variado de dimensões.



Figura 5.40 - Rosca helicoidal (sem eixo) (Cofelma, 2019)



Figura 5.41 - Rosca helicoidal (com eixo) (Cobrimetal, 2019)

Fica então definido o primeiro parâmetro de projeto:

DP_{4,6,1} – Rosca helicoidal

A rosca é responsável por mover o material, porém é importante notar que é necessário que exista movimento rotacional da rosca para que este movimento exista, e por isso define-se o segundo requisito funcional:

FR_{4,6,2} – Inserir velocidade angular na rosca

Esta velocidade angular é inserida na rosca diretamente através de um motor elétrico, montado no extremo do transportador (como pode ser observado na zona à direita da Figura 5.42)



Figura 5.42 – Motor no transportador

DP_{4,6,2} – Motor

É importante que a rosca que movimenta o material esteja completamente isolada do contacto exterior, para evitar contaminação do material e também para evitar que haja levantamento de pó, visto que esta movimentação exige que o material se mova constantemente, o que pode ser problemático para material com teor de humidade mais reduzido. Porém se o sistema for fechado não existe qualquer problema.

FR_{4,6,3} – Isolar o local de movimento de material

Este isolamento é feito pela estrutura exterior do transportador, em forma de calha, sendo que é possível abrir o transportador por cima para efeitos de manutenção (ao contrário dos tubulares, em que é necessário abrir na extremidade para retirar a rosca).

DP_{4,6,3} – Estrutura exterior (Figura 5.43)



Figura 5.43 - Estrutura exterior do transportador

Por fim, existe um problema comum neste tipo de transportadores que deve ser considerado desde a sua conceção para que seja evitado. Devido ao tipo de movimentação, a entrada e saída

de material deve ser feita por cima e por baixo, respetivamente (como pode ser observado no esquema representado na Figura 5.44)

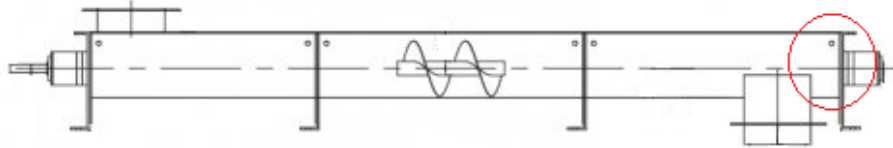


Figura 5.44 - Esquema de um Transportador de parafuso sem-fim (Palamatic Process, 2019)

Observando o funcionamento destes transportadores notou-se que o material à saída tende a permanecer na zona destacada com a circunferência a vermelho na Figura 5.44, ficando aí depositado, podendo levar a problemas tanto a nível de desperdício de material como de consumo excessivo de energia (material depositado em excesso pode levar a uma resistência acrescida). É então necessário incluir um requisito funcional que se foque na deposição de material no transportador.

FR_{4,6,4} – Evitar deposição de material à saída

Para este problema existem duas soluções tipicamente utilizadas, porém para efeitos da análise irá apenas ser considerada a mais utilizada, sendo a solução alternativa apenas utilizada em casos raros.

A primeira solução consiste em inserir uma inclinação em todo o conjunto – representado na Figura 5.45.

DP_{4,6,4} – Inclinação do conjunto

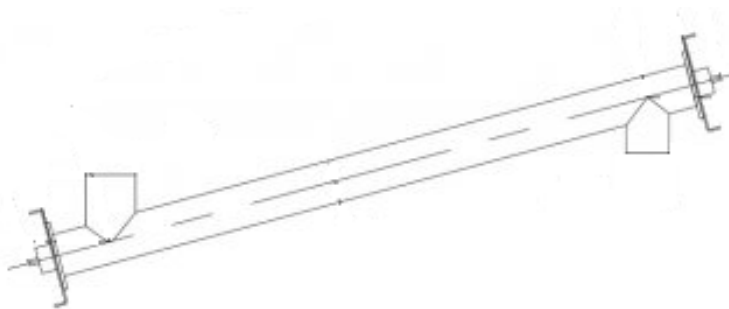


Figura 5.45 - Esquema do transportador inclinado (Palamatic Process, 2019)

Esta inclinação faz com que o material tenda a cair pela saída pela ação da gravidade, ou seja, mesmo que este seja levado até a extremidade do transportador por ação da rosca, a inclinação do sistema vai garantir que cai pela saída de material.

A alternativa à inclinação do sistema seria a alteração do sentido da rosca na zona de saída do transportador – como está exemplificado na Figura 5.46. Isto levaria a que com o movimento rotacional o material fosse obrigado a retornar para a zona de saída. Porém esta solução é de difícil implementação devido ao alto custo de maquinar uma rosca com as características necessárias.

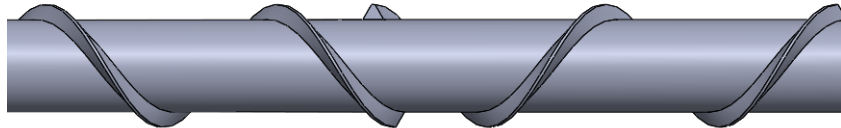


Figura 5.46 - Exemplo de rosca alternativa

É então feita a equação de projeto deste equipamento:

$$\begin{bmatrix} FR_{4,6,1} \\ FR_{4,6,2} \\ FR_{4,6,3} \\ FR_{4,6,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 \\ \times & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{4,6,1} \\ DP_{4,6,2} \\ DP_{4,6,3} \\ DP_{4,6,4} \end{bmatrix} \quad [5.16]$$

É interessante notar que ao inserir a inclinação no conjunto a movimentação é afetada, visto que o efeito da gravidade vai contrariar o movimento do material até à saída, e por isso a inclinação deve ser introduzida com cautela. Utilizando a alternativa (rosca com dois sentidos) o projeto torna-se totalmente desacoplado, o que é preferível, porém o custo das peças evita que esta seja a solução adotada em todos os casos.

5.3.12 DP_{5,1} – Sistema de filtragem de ar (moinhos)

Ao longo da produção existem dois momentos em que o material terá de ser triturado para diminuir as suas dimensões. O processo de trituração causa o levantamento de fragmentos de pequenas dimensões (denominadas daqui para a frente como pó) que tornam difícil o transporte do material entre processos.

Adicionalmente, o transporte à saída dos moinhos que são responsáveis pela trituração do material é feito utilizando um sistema pneumático, isto leva a que o ar utilizado para movimentar o material tenha de escapar para a atmosfera. Obviamente, o ar de escape não pode conter fragmentos de madeira, tanto por apresentar uma contaminação ambiental, como por ser considerado um desperdício de recursos.

Por estas razões é necessário um sistema (Figura 5.47) que filtre o ar utilizado para mover pneumáticamente o material à saída dos moinhos, sendo que seguidamente se irão considerar os “Requisitos Funcionais” de tal sistema.



Figura 5.47 - Sistema de filtragem de ar

Inicialmente deve-se perceber que à saída do moinho o material de dimensões adequadas e o pó estão misturados, sendo que no transportador pneumático não há forma de separar este material. Esta então deve ser a primeira tarefa de um sistema de filtragem.

FR_{5,1,1} – Separar as partículas de maior dimensão do pó

Esta separação é feita pela estrutura troncocónica do lado direito da Figura 5.47, denominada de “ciclone”, cujo funcionamento é explicado no esquema da Figura 5.48.

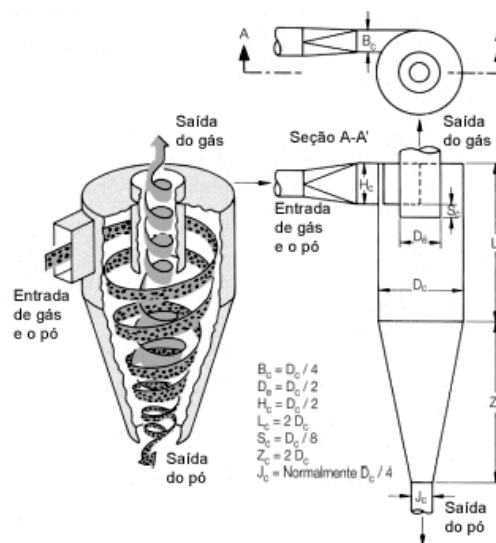


Figura 5.48 - Esquema de funcionamento de um ciclone (SOLERPALAU, 2019)

DP_{5,1,1} – Ciclone

O ar saturado de pó e partículas de madeira (neste caso proveniente dos moinhos) entra pela zona superior do ciclone, aí um fluxo de ar ciclónico vai fazer com que o material seja empurrado para as zonas laterais da estrutura. Na teoria os gases escapariam pela zona superior por ação de um ventilador e as partículas de madeira cairiam por ação da gravidade devido a sua massa. Porém o pó tem dimensões muito reduzidas, isto faz com que grande parte deste seja levado no ar de escape e necessite de ser filtrado novamente.

De seguida ter-se-á de um lado, o material de dimensões adequadas que deverá ser encaminhado diretamente para o próximo processo, e do outro, ar saturado de pó que ainda não está pronto para o escape para a atmosfera. Sendo assim, o próximo requisito funcional será:

FR_{5,1,2} – Separar o pó do ar de escape

Para levar a cabo este requisito funcional utiliza-se na linha um “filtro de mangas” (representado na Figura 5.49).

DP_{5,1,2} – Filtro de mangas

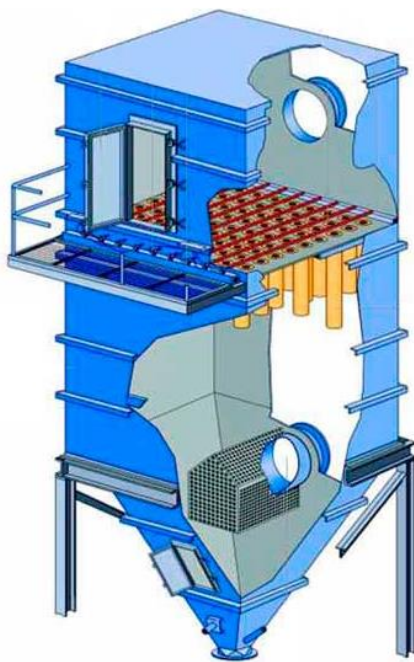


Figura 5.49 -Filtro de mangas (Silos Cordoba, 2019)

Este filtro receberá o ar ainda saturado de madeira (de muito pequenas dimensões nesta fase) pelo tubo de entrada na zona inferior. Na entrada está colocada uma rede que evita que algum fragmento de grandes dimensões possa chegar à zona das mangas de tecido.

Por ação de um ventilador, o ar saturado de madeira flui da zona inferior para a zona superior do filtro, passando por um conjunto de mangas de tecido que filtraram qualquer partícula de madeira presente no ar. O ar já filtrado escapa pelo tubo de saída situado na zona superior do filtro.

As mangas de tecido estão fixas numa plataforma vibratória. A vibração da plataforma faz com que o material que fica retido nas mangas de tecido caia para a zona inferior do filtro, onde existe um tubo de saída.

Finalmente deve-se considerar a movimentação do material à saída do ciclone e do filtro de mangas, e por esta razão surgem dois Requisitos Funcionais, um diretamente ligado à movimentação do material, e outro considerando a mistura do material de maiores dimensões com o pó que é filtrado no filtro de mangas.

FR_{5,1,3} – Movimentar o material à saída

FR_{5,1,4} – Misturar o pó com o material de maiores dimensões

Este último pode causar uma certa confusão, pois todo o propósito do sistema pareceu ser a separação dos dois componentes, no entanto deve-se notar que à entrada o material estava a ser transportado pneumaticamente e o simples depósito das partículas de maiores dimensões iria fazer com que o pó fosse levado para a atmosfera. Procedendo desta forma, o material passou de um estado cineticamente instável no transporte pneumático, para um transporte mais controlado não suscetível ao levantamento de poeiras, utilizando o máximo de material possível para não existirem desperdícios.

Para suprir os “Requisitos Funcionais” anteriormente observados é utilizado um Transportador de parafuso sem-fim na zona inferior do sistema (que pode ser observado na zona inferior da Figura 5.47), estrategicamente posicionado para que possa receber material dos dois equipamentos.

DP_{5,1,3} – Transportador de parafuso sem-fim

DP_{5,1,4} – Posicionamento dos equipamentos

Desta forma chega-se à equação de projeto deste equipamento:

$$\begin{bmatrix} FR_{5,1,1} \\ FR_{5,1,2} \\ FR_{5,1,3} \\ FR_{5,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{5,1,1} \\ DP_{5,1,2} \\ DP_{5,1,3} \\ DP_{5,1,4} \end{bmatrix} \quad [5.17]$$

A equação é característica de um projeto desacoplado.

5.3.13 DP_{5,2} – Estação de limpeza e filtragem de gases

Após a secagem do material no secador de tambor rotativo, um dos *outputs* obtidos será ar saturado de partículas de madeira devido ao contacto direto com o material.

A combustão que ocorre na fornalha responsável pela temperatura do fluxo de ar gera gases que podem ser encaminhados até ao secador (apesar de existir um sistema de filtragem à saída da fornalha). Estes gases são também um *output* do processo de secagem.

Obviamente este ar terá de ser tratado antes que escape para a atmosfera, tanto para reutilizar fragmentos de madeira que tenham possibilidade de ser utilizados no processo de produção, como para limpar contaminantes imediatamente antes do escape dos gases para a atmosfera.

A primeira preocupação do sistema será garantir que qualquer fragmento de madeira utilizável seja filtrado à saída do secador:

FR_{5,2,1} – Filtrar o ar de fragmentos de madeira

Dado que fazendo esta filtragem vão existir dois *outputs* (o ar, ainda saturado de impurezas, e os fragmentos de madeira) é necessário garantir que ambos prosseguem para os devidos locais onde serão processados. O ar seguirá nas condutas que o levam entre processos e finalmente à saída, pelo que não será abordado nesta análise. Porém os fragmentos devem ser encaminhados devidamente de volta à linha.

FR_{5,2,2} – Encaminhar os fragmentos filtrados de volta à linha

Finalmente o ar já previamente filtrado de fragmentos de maiores dimensões deve ser limpo da madeira saturada, sendo que o *output* final deve ser apenas ar e vapor de água (proveniente do sistema de lavagem).

FR_{5,2,3} – Limpar a madeira em excesso dos gases de escape

Uma vez definidos os “Requisitos Funcionais” deste sistema, a linha foi analisada de maneira a descobrir como são satisfeitos. O primeiro parâmetro de projeto presente para suprir os FRs é um equipamento que já foi anteriormente visto (capítulo 5.3.12), porém com algumas diferenças. Para proceder à filtração é utilizado um sistema de ciclones que pode ser observado na parte esquerda da Figura 5.50.

DP_{5,2,1} – Sistema de ciclones



Figura 5.50 - Sistema de ciclones separadores

Pode também ser observado na Figura 5.50 que existem duas saídas neste sistema: uma de ar por cima do equipamento e outra pela zona inferior, sendo que esta se destina aos fragmentos pesados e que são separados nos ciclones. Isto leva diretamente ao próximo parâmetro de projeto, que visa o encaminhamento destes fragmentos de volta à linha de produção.

DP_{5,2,2} – Transportador de parafuso sem-fim

O encaminhamento é feito por um sem-fim colocado na zona de saída dos fragmentos (pode ser observado na zona inferior da Figura 5.51), que leva o material até ao sem-fim de saída do secador.

Finalmente chega à fase de limpeza dos gases, que é feita numa estação de lavagem de gases, que vai ser analisada em mais detalhe no próximo nível da análise axiomática.



Figura 5.51 - Transportador de parafuso sem-fim dos ciclones separadores



Figura 5.52 - Estação de lavagem de gases

DP_{5,2,3} – Estação de lavagem de gases (Figura 5.52)

Este sistema de filtragem e lavagem também apresenta uma matriz de processo desacoplada, devido a utilizar mecanismos independentes para satisfazer os “Requisitos Funcionais” definidos, e por isso cada um destes mecanismos será analisado em mais detalhe no próximo nível da análise axiomática.

5.3.14 DP_{6,3} – Sistema de remoção de material

A detecção e extinção de um possível incêndio ao longo da linha de produção tem uma grande importância, contudo a remoção do material do sistema de distribuição também é de grande importância.

Esta remoção serve dois propósitos: a remoção de material que possivelmente esteja em chamas (caso o sistema de extinção não resulte) ou simplesmente limpar o canal por onde é feita a distribuição de qualquer material humedecido pela ação dos aspersores.

Este é um sistema simples que apenas visa a remoção do material afetado da zona onde é feita a distribuição, pelo que os “Requisitos Funcionais” serão:

FR_{6,3,1} – Remover o material do canal de distribuição

FR_{6,3,2} – Retirar o material da zona circundante

FR_{6,3,3} – Armazenar o material afetado (em zona segura)

A primeira fase da remoção de material é a descarga em si. Uma vez detetada a faísca e acionados os expressores, uma válvula de descarga é ativada e abre a zona inferior do transportador para que o material possa cair.

DP_{6,3,1} – Válvula de descarga (Figura 5.53)



Figura 5.53 - Válvula de descarga

O material é assim extraído do Transportador de parafuso sem-fim, porém nesta fase ainda deve ser afastado da zona do transportador segundo o FR_{6,3,2}. Este afastamento pela queda do material para um transportador de correia que é ativado assim que é detetada a faísca. A zona de sobreposição da válvula e do transportador pode ser observada na zona à direita da Figura 5.54.

DP_{6,3,2} – Transportador de correia (Figura 5.54)



Figura 5.54 - Transportador de correia

Finalmente deve-se considerar que o material não pode ser depositado num sítio aleatório, sendo que é importante tanto o isolamento do local, como a facilidade de remoção dos resíduos *a-posteriori*. Por esta razão foi criado um bloco de descarga com três lados que armazena o material afetado.

DP_{6,3,3} – Bloco de descarga (Figura 5.55)



Figura 5.55 - Bloco de descarga

Este sistema é fundamental para a correta extinção de incêndios, porém é de simples projeção e obedece completamente ao Axioma da Independência, visto que cada um dos “Requisitos Funcionais” são correspondidos por equipamentos independentes entre si e que em nada afetam o comportamento de outros equipamentos.

5.3.15 Análise de nível

Nesta fase da análise torna-se difícil desenhar um diagrama dos FRs e DPs, visto que são em número muito elevado sendo que as ramificações se tornariam quase ilegíveis, por isso, e para servir de resumo da análise feita até agora, seguidamente serão enumerados cada um dos “Requisitos Funcionais” e “Parâmetros de Projeto” até agora identificados.

- FR₁ – Preparar a matéria-prima para a peletização
 - FR_{1,1} – Separar fragmentos com dimensões inferiores a 15mm
 - FR_{1,1,1} - Separar a estilha crivada (dimensões < 3,5 mm)
 - FR_{1,1,2} - Separar aglomerados na matéria-prima
 - FR_{1,1,3} - Encaminhar o material longitudinalmente ao longo do cilindro
 - FR_{1,1,4} - Filtrar partículas metálicas
 - FR_{1,2} – Reduzir as dimensões do material para valores inferiores a 15 mm
 - FR_{1,2,1} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{1,2,2} – Separar componentes metálicos
 - FR_{1,2,3} – Separar pedras
 - FR_{1,2,4} – Triturar a matéria-prima
 - FR_{1,2,5} – Libertar partículas com dimensões < 15 mm
 - FR_{1,3} - Reduzir o teor de humidade da matéria-prima para valor <12 %

- FR_{1,3,1} – Fornecer o caudal necessário de ar ao secador
 - FR_{1,3,2} – Fornecer temperatura ao fluxo de ar
 - FR_{1,3,3} – Movimentar o material
 - FR_{1,3,4} – Garantir a homogeneidade da secagem
- FR_{1,4} - Regularizar as dimensões da matéria-prima para cerca de 4 mm
 - FR_{1,4,1} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{1,4,2} – Separar componentes metálicos
 - FR_{1,4,3} – Triturar a matéria-prima
 - FR_{1,4,4} – Libertar partículas com dimensões < 4 mm
- FR₂ – Peletizar o material
 - FR_{2,1} – Conferir aos *pellets* diâmetros entre 6 e 8 mm
 - FR_{2,2} – Conferir aos *pellets* comprimento entre 3,15 e 40 mm
 - FR_{2,3} – Conferir aos *pellets* a consistência necessária.
 - FR_{2,4} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{2,5} – Evitar a dispersão dos *pellets* à saída
 - FR_{2,6} – Atenuar as forças de atrito entre o material e a matriz
- FR₃ - Preparar os *pellets* para expedição;
 - FR_{3,1} – Arrefecer os *pellets*
 - FR_{3,1,1} – Reduzir a temperatura dos *pellets*
 - FR_{3,1,2} – Armazenar os *pellets*
 - FR_{3,1,3} – Adequar o tempo de arrefecimento
 - FR_{3,2} – Remover os finos
 - FR_{3,2,1} – Separar aglomerados de finos dos *pellets*
 - FR_{3,2,2} – Encaminhar os dois materiais separadamente
 - FR_{3,2,3} – Movimentar o material ao longo do crivo
 - FR_{3,3} – Ensacar os *pellets*
 - FR_{3,3,1} – Ensacar os *pellets* em *Big Bags*
 - FR_{3,3,2} – Ensacar os *pellets* em sacos de 15 kg
- FR₄ - Encaminhar o material entre processos
 - FR_{4,1} – Armazenar estilha
 - FR_{4,1,1} – Armazenar a estilha
 - FR_{4,1,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,2} – Transportar estilha (3-10 cm / 50 % humid.)
 - FR_{4,2,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,2,2} – Movimentar a correia

- FR_{4,2,3} – Adequar a altura da saída de material
 - FR_{4,3} – Armazenar serrim (verde)
 - FR_{4,3,1} – Armazenar serrim
 - FR_{4,3,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,4} – Transportar serrim (verde) (10-15 mm/ 50% humid.)
 - FR_{4,5} – Armazenar serrim (seco)
 - FR_{4,5,1} – Armazenar serrim
 - FR_{4,5,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,6} – Transportar serrim (seco) (10-15 mm/ 12% humid.)
 - FR_{4,6,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,6,2} – Inserir velocidade angular na rosca
 - FR_{4,6,3} – Isolar o local de movimento de material
 - FR_{4,6,4} – Evitar deposição de material à saída
 - FR_{4,7} – Armazenar matéria-prima final
 - FR_{4,7,1} – Armazenar matéria-prima final
 - FR_{4,7,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,8} – Transportar matéria-prima final (4mm / 12% humid.)
 - FR_{4,8,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,8,2} – Inserir velocidade angular na rosca
 - FR_{4,8,3} – Isolar o local de movimento de material
 - FR_{4,8,4} – Evitar deposição de material à saída
 - FR_{4,9} – Armazenar *pellets*
 - FR_{4,9,1} – Armazenar *pellets*
 - FR_{4,9,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,10} – Transportar *pellets*
 - FR_{4,10,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,10,2} – Movimentar a correia
 - FR_{4,10,3} – Adequar a altura da saída de material
- FR₅ - Filtrar ar
 - FR_{5,1} – Filtrar o ar à saída dos moinhos
 - FR_{5,1,1} – Separar as partículas de maior dimensão do pó
 - FR_{5,1,2} – Separar o pó do ar de escape
 - FR_{5,1,3} – Movimentar o material à saída
 - FR_{5,1,4} – Misturar o pó com o material de maiores dimensões
 - FR_{5,2} – Filtrar o ar à saída do secador

- FR_{5,2,1} – Filtrar o ar de fragmentos de madeira
 - FR_{5,2,2} – Encaminhar os fragmentos filtrados de volta à linha
 - FR_{5,2,3} – Limpar a madeira em excesso dos gases de escape
- FR₆ - Prevenir o acontecimento de incêndios
 - FR_{6,1} – Detetar faíscas
 - FR_{6,2} – Humedecer material afetado
 - FR_{6,3} – Retirar o material da linha
 - FR_{6,3,1} – Remover o material do canal de distribuição
 - FR_{6,3,2} – Retirar o material da zona circundante
 - FR_{6,3,3} – Armazenar o material afetado (em zona segura)

Enumeram-se também os “Parâmetros de Projeto” da mesma forma:

- DP₁ – Sistema de preparação de matéria-prima
 - DP_{1,1} – Crivo rotativo
 - DP_{1,1,1} – Orifícios da matriz cilíndrica
 - DP_{1,1,2} – Velocidade angular do cilindro
 - DP_{1,1,3} – Inclinação do cilindro
 - DP_{1,1,4} – Magneto permanente
 - DP_{1,2} – Moinho de martelos (verdes)
 - DP_{1,2,1} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{1,2,2} - Magneto permanente
 - DP_{1,2,3} – *Stone Trap*
 - DP_{1,2,4} – Martelos
 - DP_{1,2,5} – Tela
 - DP_{1,3} – Secador de tambor rotativo
 - DP_{1,3,1} – Ventilador
 - DP_{1,3,2} – Fornalha
 - DP_{1,3,3} – Movimento de rotação
 - DP_{1,3,4} – Estrutura do secador
 - DP_{1,3,5} – Intervenção de operadores
 - DP_{1,4} – Moinho de martelos (secos)
 - DP_{1,4,1} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{1,4,2} - Magneto permanente
 - DP_{1,4,3} – Martelos
 - DP_{1,4,4} – Tela

- DP₂ – Prensa peletizadora
 - DP_{2,1} – Matriz de peletização
 - DP_{2,2} – Pente de corte
 - DP_{2,3} – Rolos da prensa
 - DP_{2,4} – Sem-fim
 - DP_{2,6} – Jatos de vapor de água
- DP₃ – Sistema de pós-produção
 - DP_{3,1} – Arrefecedor
 - DP_{3,1,1} - Fluxo de ar frio
 - DP_{3,1,2} – Estrutura do arrefecedor
 - DP_{3,1,3} – Sistema sensor/válvula
 - DP_{3,2} – Crivo vibratório
 - DP_{3,2,1} -Movimento vibratório
 - DP_{3,2,2} – Plataforma perfurada
 - DP_{3,2,3} – Inclinação
 - DP_{3,3} – Sistema de ensacamento
 - DP_{3,3,1} – Mecanismo de ensacamento em *Big Bags*
 - DP_{3,3,2} – Mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg
- DP₄ - Sistema de distribuição
 - DP_{4,1} – Silo de estilha
 - DP_{4,1,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,1,2} – Sistema de alimentação
 - DP_{4,2} – Transportador de correia
 - DP_{4,2,1} – Correia transportadora
 - DP_{4,2,2} – Sistema de rolos
 - DP_{4,2,3} – Inclinação do transportador
 - DP_{4,3} – Silo de serrim (1)
 - DP_{4,3,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,3,2} – Sistema de alimentação
 - DP_{4,4} – Transportador pneumático
 - DP_{4,5} – Silo de serrim (2)
 - DP_{4,5,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,5,2} – Sistema de alimentação
 - DP_{4,6} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{4,6,1} – Rosca helicoidal

- DP_{4,6,2} – Motor
 - DP_{4,6,3} – Estrutura exterior
 - DP_{4,6,4} – Inclinação do conjunto
 - DP_{4,7} – Silo (3)
 - DP_{4,7,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,7,2} – Sistema de alimentação
 - DP_{4,8} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{4,8,1} – Rosca helicoidal
 - DP_{4,8,2} – Motor
 - DP_{4,8,3} – Estrutura exterior
 - DP_{4,8,4} – Inclinação do conjunto
 - DP_{4,9} – Silo de *pellets* (4)
 - DP_{4,9,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,9,2} – Sistema de alimentação
 - DP_{4,10} – Transportador de correia
 - DP_{4,10,1} – Correia transportadora
 - DP_{4,10,2} – Sistema de rolos
 - DP_{4,10,3} – Inclinação do transportador
- DP₅ - Sistema de filtragem e reaproveitamento
 - DP_{5,1} – Sistema de filtragem de ar (moinhos)
 - DP_{5,1,1} – Ciclone
 - DP_{5,1,2} – Filtro de mangas
 - DP_{5,1,3} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{5,1,4} – Posicionamento dos equipamentos
 - DP_{5,2} – Estação de limpeza e filtragem de gases
 - DP_{5,2,1} – Sistema de ciclones
 - DP_{5,2,2} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{5,2,3} – Estação de lavagem de gases
- DP₆ - Sistema de deteção e extinção de incêndios
 - DP_{6,1} – Sensor de faíscas
 - DP_{6,2} – Aspersores
 - DP_{6,3} – Sistema de remoção de material
 - DP_{6,3,1} – Válvula de descarga
 - DP_{6,3,2} – Transportador de correia
 - DP_{6,3,3} – Bloco de descarga

A lista de “Requisitos Funcionais” e “Parâmetros de Projeto” já é bastante extensa (como é de esperar em qualquer projeto complexo como uma linha de produção). Porém alguns parâmetros podem ainda ser analisados mais ao pormenor, pelo que é benéfico prolongar a análise por mais um nível, o que será feito no próximo capítulo.

Dada a extensão de FRs e DPs, torna-se impossível construir a equação de projeto de forma legível, por isso, analisar-se-ão as matrizes de projeto baseadas na divisão feita no nível 1 da análise. Porém nos anexos B1, B2, B3, B4, B5 e B6 pode ser observada toda a decomposição do projeto.

Inicia-se a análise deste nível observando a matriz de projeto referente à decomposição do FR_1 –Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Matriz de projeto - FR_1

FR ₁ / DP ₁	DP _{1,1}				DP _{1,2}					DP _{1,3}				DP _{1,4}				
	1,1,2	1,1,1	1,1,3	1,1,4	1,2,1	1,2,2	1,2,3	1,2,5	1,2,4	1,3,5	1,3,4	1,3,2	1,3,1	1,3,3	1,4,1	1,4,2	1,4,4	1,4,3
FR _{1,1}	1,1,2	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,1,1	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,1,3	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,1,4	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FR _{1,2}	1,2,1	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,2,2	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,2,3	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,2,5	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,2,4	0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0
FR _{1,3}	1,3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
	1,3,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
	1,3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0
	1,3,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	0	0	0	0
	1,3,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0
FR _{1,4}	1,4,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
	1,4,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0
	1,4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	1,4,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X

Nesta fase da análise pode-se observar um projeto desacoplável, sendo as relações fora da diagonal cada vez mais numerosas. Estas relações, no entanto, não se verificam entre ramificações diferentes, o que é bastante positivo.

É de notar, por exemplo, a presença de 3 DPs iguais ($DP_{1,1,4}$, $DP_{1,2,2}$, $DP_{1,4,2}$ – Magneto permanente). Isto pode parecer uma repetição desnecessária, mas ao garantir que cada um dos mecanismos tem o seu próprio magneto permanente garante-se que os “Requisitos Funcionais” desse mecanismo não são afetados por um DP de outro mecanismo diferente, garantindo assim uma independência entre ramificações muito proveitosa em termos de projeto.

Não irá ser feita a análise das ramificações do FR_2 pois este não foi ramificado, uma vez que no segundo nível já foram descobertos os componentes do mecanismo a um nível suficientemente pormenorizado para o seu funcionamento ser analisado e explicado.

Seguidamente pode ser observada a matriz de projeto das ramificações do FR_3 –Tabela 5.3

Tabela 5.3 - Matriz de projeto - FR₃

FR ₃ /DP ₃		DP _{3,1}			DP _{3,2}			DP _{3,3}	
		3,1,1	3,1,2	3,1,3	3,2,3	3,2,2	3,2,1	3,3,1	3,3,2
FR _{3,1}	3,1,1	X	0	0	0	0	0	0	0
	3,1,2	0	X	X	0	0	0	0	0
	3,1,3	0	0	X	0	0	0	0	0
FR _{3,2}	3,2,3	0	0	0	X	0	X	0	0
	3,2,3	0	0	0	0	X	0	0	0
	3,2,1	0	0	0	0	0	X	0	0
FR _{3,3}	3,3,1	0	0	0	0	0	0	X	0
	3,3,2	0	0	0	0	0	0	0	X

Mais uma vez pode ser observada uma pequena alteração da ordem dos FRs e DPs para que a matriz se apresente triangular superior, e desta maneira visivelmente desacoplada. Mais uma vez se observa que os FRs e DPs apenas se relacionam dentro da própria ramificação, o que é positivo.

As ramificações do FR₄ não são interessantes de observar numa perspectiva de matriz de projeto, pois os “Parâmetros de Projeto” são muito semelhantes e todos referentes a armazenamento do material em diferentes estados, logo não existiram relações entre os FRs e DPs para além daquelas que foram anteriormente referidas. As matrizes de projeto individuais são também muito semelhantes ou iguais entre si, pelo que o desenho da matriz na sua totalidade seria muito extenso e sem grande informação adicional.

A matriz de projeto referente à decomposição do FR₅ é do tipo diagonal, sendo característica de um projeto desacoplado. Os “Parâmetros de Projeto” serão analisados posteriormente para obter um melhor entendimento do funcionamento de cada um deles.

Relativamente ao FR₆, foi ramificado apenas um DP, pelo que as alterações à matriz de projeto não foram significativas para serem observadas nesta fase.

5.4 Nível 4

Este subcapítulo irá abordar a última fase da análise axiomática. Sendo que se julga que o quarto nível representa uma análise bastante profunda e que esta já pode apresentar resultados muito positivos tanto em termos de conclusões e informação sobre a linha de produção como de melhorias possíveis para o aumento de produtividade da linha.

Mais uma vez não estão representados todos os DPs provenientes da última análise uma vez que muitos deles representam equipamentos demasiado simples cuja análise foi feita imediatamente durante a sua definição (exemplo do *stone trap* entre outros)

Existem outros DPs mais complexos que não serão analisados, pois essa análise não acrescenta valor à presente tese pois não são equipamentos diretamente relacionados com a produção de *pellets*, mas sim equipamentos gerais cuja literatura apresenta já vastas análises e definições (exemplo do ventilador entre outros).

5.4.1 DP_{1,3,2} – Fornalha

Para esta análise, considerou-se a fornalha como todo o conjunto que é responsável pela inceneração de madeira/cortiça que gera o calor necessário para o fluxo de ar do secador, bem como o sistema de limpeza desse mesmo ar. Apesar da fornalha ser apenas o mecanismo de inceneração achou-se mais interessante analisar desta forma.

A fornalha é responsável pela inceneração de material. O calor gerado vai aumentar a temperatura do fluxo de ar que depois vai ser encaminhado para o secador. O primeiro requisito funcional será relativo à alimentação do fogo da fornalha, ficando assim definido:

FR_{1,3,2,1} – Alimentar a fornalha (material)

Neste momento a alimentação da fornalha é feita com recurso a dois componentes: estilha de madeira e pó de cortiça. A utilização do pó de cortiça aumenta muito a produtividade da fornalha, gerando altas temperaturas com relativamente poucas quantidades de pó, porém a sua queima não é duradoura, e por isso utiliza-se estilha e até elementos de madeira de maiores dimensões para manter a chama viva. A utilização de dois materiais leva a que sejam utilizados dois DPs para satisfazer este FR.

DP_{1,3,2,1} – Sistema de alimentação de estilha (Figura 5.56)



Figura 5.56 - Sistema de alimentação de estilha

Pode-se observar que este sistema consiste num silo e num Transportador de parafuso sem-fim que procede ao encaminhamento do material até à entrada da fornalha. Quando não está a ser utilizado, a alimentação da estilha é feita manualmente pela porta que se pode observar na zona à direita da Figura 5.56.

DP_{1,3,2,2} – Sistema de alimentação do pó de cortiça (Figura 5.57)



Figura 5.57 - Sistema de alimentação de pó de cortiça

O pó de cortiça é um material obtido dentro da fábrica porém noutra zona responsável apenas pela transformação de cortiça, por isso é utilizado o pó gerado nessa zona, transportando-o até um silo fechado (que pode ser observado na Figura 5.57) onde é depositado com recurso a um elevador. A razão pela qual não se pode utilizar um silo aberto como o de estilha (Figura 5.56)

é que o material com que se está a trabalhar (pó de cortiça) tem dimensões muito baixas, pelo que a sua simples queda para dentro do silo levaria a um grande desperdício de material, para além de representar um grande risco de incêndio ou explosão, já que o pó de cortiça tem uma combustão muito fácil.

É também necessário que haja forma de alimentar a chama com oxigénio, pois as fornalhas são mecanismos fechados e para que a inceneração seja feita da melhor forma, o caudal de ar deve ser adequado.

FR_{1,3,2,2} – Fornecer o caudal de ar adequado

De seguida existe a necessidade de expelir os gases causados pela inceneração, uma vez que se forem completamente encaminhados para o secador podem causar o mau funcionamento do mesmo ou do ventilador. O ideal seria que todo o fumo fosse expelido e apenas ar quente fosse encaminhado para o secador.

FR_{1,3,2,3} – Expelir os gases de inceneração em excesso

Os dois “Requisitos Funcionais” anteriores são correspondidos por dois tipos de equipamentos de ventilação. Para o fornecimento do caudal de ar são utilizadas condutas pelas quais o ar vai ser sugado de forma natural pela inceneração do material. Estas condutas podem ser observadas na Figura 5.58.

DP_{1,3,2,3} – Condutas de entrada de ar (Figura 5.58)



Figura 5.58 - Condutas de entrada de ar

O escape do fumo e gases de inceneração indesejados para o fluxo de ar quente é feito com recurso a uma chaminé colocada na zona superior da fornalha como pode ser observado na Figura 5.59.

DP_{1,3,2,4} – Chaminé de escape (Figura 5.59)



Figura 5.59 - Chaminé de escape

Uma vez obtido o fluxo de ar quente é necessário que este seja filtrado para que nenhuma partícula de cinza passe para o secador de forma a não contaminar a madeira que está a ser seca no seu interior. Tendo isto em conta, é definido o seguinte requisito funcional:

FR_{1,3,2,4} – Filtrar o ar quente

A filtragem do ar saturado com partículas de pó nesta linha de produção é sempre feita com recurso a ciclones separadores, e este caso não é exceção, sendo que são utilizados dois ciclones separadores em paralelo para a filtragem do ar como se pode observar na Figura 5.60.

DP_{1,3,2,5} – Sistema de ciclones separadores (Figura 5.60)



Figura 5.60 - Sistema de ciclones separadores

O fluxo de ar é então encaminhado por condutas até ao secador, e o material recolhido nos ciclones separadores precisa de ser retirado do local e armazenado para que seja eliminado convenientemente. No subcapítulo referente ao ciclones separadores este sistema é observado ao detalhe por isso não será revisto aqui, sendo que a informação relevante será que os resíduos são encaminhados por um Transportador de parafuso sem-fim (que se pode ver na Figura 5.60 de baixo dos ciclones separadores) até um recipiente que contem as cinzas até à sua remoção de forma manual.

É então finalizada a obtenção dos FRs e DPs deste subsistema e pode ser elaborada a equação de projeto nesta fase:

$$\begin{bmatrix} FR_{1,3,2,1} \\ FR_{1,3,2,2} \\ FR_{1,3,2,3} \\ FR_{1,3,2,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,3,2,1} \\ DP_{1,3,2,2} \\ DP_{1,3,2,3} \\ DP_{1,3,2,4} \\ DP_{1,3,2,5} \end{bmatrix} \quad [5.18]$$

É interessante notar que se está perante um projeto com mais DPs do que FRs, devido ao fornecimento de material depender de dois sistemas diferentes, o de pó de cortiça e o de estilha. Segundo o terceiro teorema da Teoria Axiomática de Projeto, este projeto é redundante e como tal a sua análise requer uma atenção especial, para isto é interessante analisar a literatura existente sobre este tipo de projetos.

“Theorem R1: All redundant designs with right-trapezoid design matrices are decoupled.”
(Gonçalves-Coelho, Neştian, Cavique, & Mourão, 2012)

Segundo o teorema R1 apresentado pelos autores do artigo citado, todos os projetos que apresentem redundância e uma matriz trapezoidal direita são desacopláveis, e isto pode ser observado na matriz anteriormente apresentada, por isso é seguro concluir que se está perante um projeto desacoplável. O primeiro FR é alcançado pela otimização dos seus dois DPs. Os quatro FRs são funcionalmente independentes.

5.4.2 DP_{1,3,4} – Estrutura do secador

O funcionamento do secador depende em grande parte da estrutura do tambor. A forma como o material vai ser encaminhado no seu interior vai influenciar o tempo de secagem, a temperatura e a rotação inserida no secador pelo que o projeto do tambor deve ser cuidado.

Existem vários tipos de secador no mercado, sendo que seguidamente serão vistos por alto os vários tipos, finalizando com a análise axiomática do que é utilizado na empresa.

A primeira grande separação dos tipos de secador está no sentido do fluxo de ar quente, que pode ser:

- No mesmo sentido do fluxo de material (Figura 5.61)
- Sentido contrário do fluxo de material (Figura 5.62)

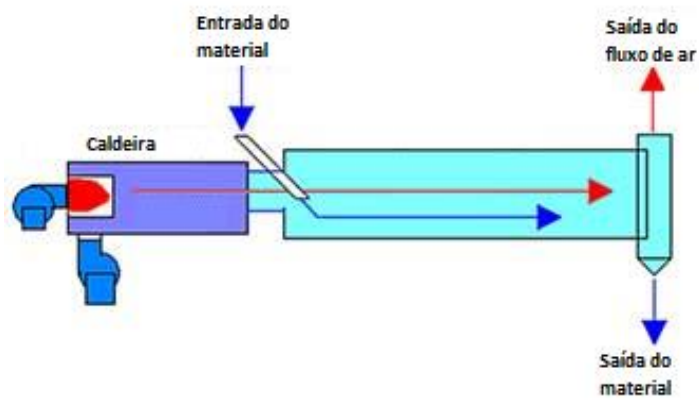


Figura 5.61 - Esquema de funcionamento do secador de fluxo concorrente [Maxton Engineering, 2019]

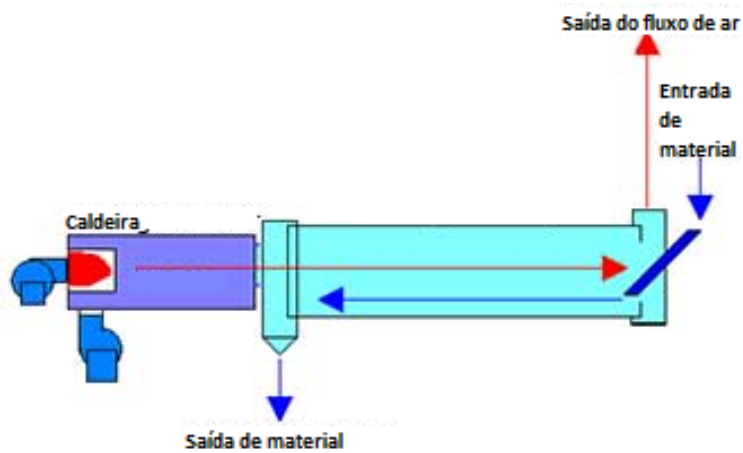


Figura 5.62 - Esquema de funcionamento do secador de fluxo contracorrente (Maxton Engineering, 2019)

Existe ainda outra divisão nos tipos de secador existentes, sendo que esta se prende pelo número de passagens do material pelo secador. Existem:

- Secadores de uma passagem (os representados nas figuras Figura 5.61 e Figura 5.62 são exemplo deste tipo)
- Secadores de múltiplas passagens (Figura 5.63)

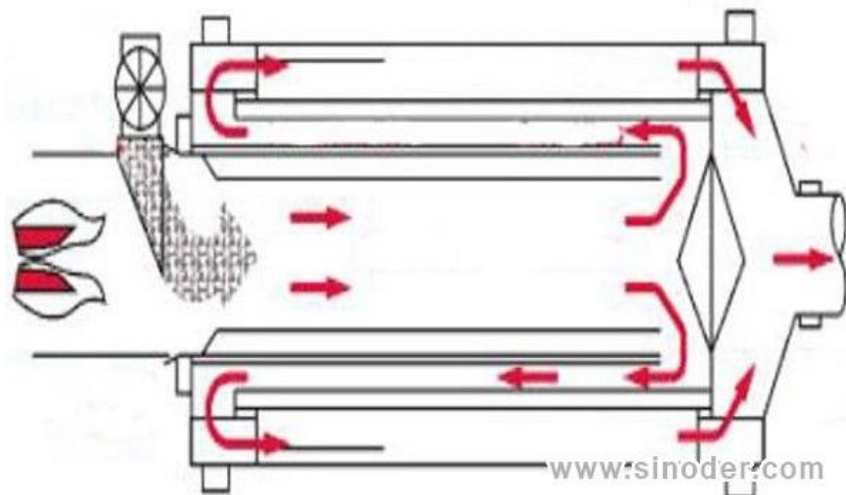


Figura 5.63 - Esquema de funcionamento de um secador de 3 passagens (Sinoder, 2019)

É interessante notar que o último tipo deve ser implementado num secador de fluxo concorrente, isto porque a movimentação do material na segunda passagem (quando o material tem o sentido da direita para a esquerda na Figura 5.63) é inteiramente feita pela ação do fluxo de ar.

Existem ainda secadores do tipo direto e indireto, a diferença será se o fluxo de ar entra diretamente em contacto com o material ou não.

Considerados os tipos de secador existentes finalmente pode-se analisar o tipo que está implementado na empresa, que é um de fluxo concorrente e de múltiplas passagens.

Para iniciar a análise devem ser definidos os Requisitos Funcionais. O mais básico será a necessidade de encaminhar o material para o seu interior já que não tem qualquer inclinação e o transportador não pode levar o material diretamente para o interior do secador.

FR_{1,3,4,1} – Encaminhar o material para o seu interior.

Esta ação de encaminhamento é feita imediatamente antes do secador, sendo o material depositado numa conduta por onde circula o fluxo de ar necessário à secagem, a movimentação do ar vai levar o material até à entrada do secador, porém a parte interessante do sistema está na forma como o material é obrigado a circular logo à entrada do secador.

Se o material fosse simplesmente levado pelo fluxo de ar até à primeira curva, este seria como pó levado por vento, sendo que a sua secagem seria irregular e impossível de controlar. Por esta razão, à entrada do secador existe uma rosca que faz com o material seja obrigado a circular junto às paredes do cilindro. O fluxo de ar, entrará pelo mesmo sítio, mas a sua circulação irá ser diferente já que se trata de um fluido.

DP_{1,3,4,1} – Rosca de entrada (Figura 5.64)



Figura 5.64 - Rosca de entrada no secador (SeaSun Machinery, 2019)

De seguida é necessário garantir que o material não é simplesmente movimentado pela ação do fluxo de ar sem interferência do movimento de rotação do secador, para que a mistura seja homogénea.

FR_{1,3,4,2} – Movimentar o material consoante a rotação

Para isto são utilizadas saliências ao longo de todo o secador, saliências que podem ser observadas na figura anterior (Figura 5.64) logo após a rosca de entrada.

DP_{1,3,4,2} – Saliências do secador

Uma preocupação acrescida de um secador com múltiplas passagens é o facto de lidar-se com material que pode ficar depositado em determinadas zonas, principalmente curvas das condutas.

O movimento rotacional do secador evita em grande parte a deposição de material, mas a existência de quinas vivas principalmente nas zonas onde o fluxo de ar e material muda de direção nos secadores de múltiplas passagens pode ser problemática, por isso deve ser considerado como requisito funcional:

FR_{1,3,4,3} – Evitar a deposição de material

Visto que os ângulos de 90 graus são os principais responsáveis pela deposição de material, a utilização de chanfros nas zonas de deposição é a solução ideal para garantir que o material circula de forma correta. Para além disso estes chanfros (e a conicidade na zona média da primeira curva do fluxo que pode ser observada na Figura 5.63) também vão melhorar a circulação do fluxo de ar.

DP_{1,3,4,3} – Chanfros e conicidade na zona média

Finalmente pode ser analisada a matriz de processo final para perceber se existem acoplamentos nesta fase do projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{1,3,4,1} \\ FR_{1,3,4,2} \\ FR_{1,3,4,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,3,4,1} \\ DP_{1,3,4,2} \\ DP_{1,3,4,3} \end{bmatrix} \quad [5.19]$$

Pode-se então observar que a matriz é característica de um projeto desacoplável, isto porque os chanfros e conicidades presentes na estrutura do secador não evitam só a deposição de material, mas também ajudam no encaminhamento do material.

Este é uma relação em que a influencia é positiva e quase impossível de eliminar, por isso não é considerado problemático, sendo que se considera o projeto da estrutura do secador bastante aceitável.

5.4.3 DP_{3,3,1} – Mecanismo de ensacamento em Big Bags

O processo final da linha de produção é o armazenamento dos *pellets* devidamente filtrados, seja em sacos para comercialização como em *big bags* para armazenamento interno na empresa. Como tal é necessário que exista um mecanismo para proceder a este ensacamento de forma automatizada. Neste subcapítulo irá analisar-se o mecanismo de ensacamento em *big bags*.

A primeira questão a considerar será o peso dos pellets a ensacar. Na empresa em questão utilizam-se *big bags* de 500, 800, 1000 e 1200 kg. A definição do saco a utilizar é feita manualmente pelo operador que está presente na estação de ensacamento.

O primeiro requisito funcional a considerar será então relacionado com o controlo do peso a depositar.

FR_{3,3,1,1} – Pesas os *pellets* a depositar

Esta pesagem é feita num silo de armazenamento equipado com 3 células de carga. Estas células de carga estão ligadas ao equipamento que deposita os pellets no silo. Isto leva à definição do segundo requisito funcional, que é relativo à necessidade de levar os *pellets* desde a área de crivagem até ao silo de pesagem.

FR_{3,3,1,2} – Transportar os *pellets* até ao silo de pesagem

Os *pellets* são levados até ao silo utilizando um transportador de correia. O motor deste transportador está equipado com um variador de frequência, fazendo com que este tenha duas velocidades, uma rápida e uma lenta.

Mediante o valor definido pelo operador, a alteração das velocidades é feita automaticamente. Assumindo, por exemplo, que se pretende encher um saco com 1000 kg, o transportador

estará a funcionar a velocidade máxima até atingir os 800 kg, passando nessa fase à velocidade reduzida, e assim permanecerá até chegar ao valor pretendido, altura em que irá parar completamente.

Podem assim ser definidos os “Parâmetros de Projeto” referentes aos FRs anteriormente obtidos.

DP_{3,3,1,1} – Silo de pesagem (células de carga)

DP_{3,3,1,2} – Transportador de correia

Ambos os “Parâmetros de Projeto” enumerados anteriormente podem ser observados na Figura 5.65, sendo que à esquerda se pode observar o transportador e na zona mais central está situado o silo de pesagem.



Figura 5.65 - Sistema de ensacamento (big bags)

Existe também a necessidade de escoar os pellets armazenados no silo de pesagem:

FR_{3,3,1,3} – Depositar os *pellets* armazenados

Isto é feito através de uma espécie de porta na zona inferior do silo, que ao abrir liberta os *pellets* que, por ação da gravidade, escoam através de um tubo (também visível na Figura 5.65) e para dentro de um *big bag*.

DP_{3,3,1,3} – Porta e tubo de saída

Por último é interessante considerar que este é um sistema que deposita os pellets utilizando um tubo, sem ser necessária a colocação do *big bag* antecipadamente. Isto leva à pergunta, o que impede a saída dos pellets diretamente para o chão por erro do operador? Isto deve ser contemplado pelos “Requisitos Funcionais” do sistema:

FR_{3,3,1,4} – Evitar a queda de pellets para o chão

Uma análise visual e de funcionamento leva à conclusão de que este é um problema que já aconteceu algumas vezes. Não existindo nenhuma forma de evitar o erro de operadores.

Isto leva à definição de um projeto com 4 FRs e 3 DPs, que, como visto anteriormente, segundo o primeiro teorema da Teoria Axiomática do Projeto (Anexo A), é característico de um projeto acoplado ou no qual os “Requisitos Funcionais” não são respeitados. Para perceber qual das situações ocorre foi obtida a equação de projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{3,3,1,1} \\ FR_{3,3,1,2} \\ FR_{3,3,1,3} \\ FR_{3,3,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,3,1,1} \\ DP_{3,3,1,2} \\ DP_{3,3,1,3} \end{bmatrix} \quad [5.20]$$

Pode ser observada a existência de uma linha em branco na matriz de projeto. Conclui-se que o FR_{3,3,1,4} não está a ser respeitado, e por isso erros que levam a milhares de kg de pellets a serem espalhados pelo chão da fábrica são, não só possíveis, como recorrentes.

No próximo capítulo será proposta uma solução para que o projeto possa ser otimizado de acordo com o Axioma da Independência. Esta proposta passará pela definição de um novo DP relativo à fixação dos sacos.

5.4.4 DP_{3,3,2} – Mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg

Os pellets para uso doméstico devem ser embalados em sacos de 15 kg, semelhantes aos que são vendidos nas superfícies comerciais. Por ser um processo relativamente rápido e simples este é altamente automatizável e neste subcapítulo será feita a análise do equipamento responsável pelo ensacamento dos pellets nos sacos de 15 kg.

Como visto anteriormente no ensacamento de *big bags*, a pesagem dos pellets deve ser um dos Requisitos Funcionais.

FR_{3,3,2,1} – Pesagem dos pellets a depositar

Esta pesagem, ao invés do mecanismo anterior, é feita diretamente no transportador que leva os pellets até à zona de saída.

Os *pellets* provenientes do crivo vibratório, são levados por um elevador até um transportador de correia (equipado com células de carga). Este transportador encaminha os *pellets* até à zona de ensacamento, depositando 15 kg de cada vez (quando chega ao valor o transportador é imobilizado).

Fica assim definido o parâmetro de projeto que responde ao primeiro requisito funcional.

DP_{3,3,2,1} – Transportador de correia (com células de carga)

Uma vez que são pesados os *pellets*, devem ser armazenados numa zona que permita o seu correto ensacamento, este é mais um requisito funcional.

FR_{3,3,2,2} – Armazenar os *pellets* para ensacamento

Para isto é necessário um silo de armazenamento muito semelhante ao anteriormente visto para o ensacamento em *big bags*, sendo que as diferenças estarão na dimensão e na ausência de células de carga.

DP_{3,3,2,2} – Silo de armazenamento

Uma vez garantido o armazenamento e pesagem dos *pellets*, mais uma vez será necessário que o sistema garanta a correta deposição dos mesmos nos sacos.

FR_{3,3,2,3} – Depositar os *pellets* armazenados

Para isto um sistema semelhante ao anteriormente visto no subcapítulo anterior é utilizado, uma porta e tubo de saída.

DP_{3,3,2,3} – Porta e tubo de saída

Mais uma vez se deve garantir que não existe deposição errónea de *pellets*. O sistema deve evitar que estes sejam depositados se o saco não estiver colocado para os receber.

FR_{3,3,2,4} – Evitar a queda dos *pellets* para o chão

De forma diferente da anterior vista, este sistema já tem um mecanismo que evita a deposição. O funcionamento é tal que retira um pouco da automatização do processo, visto que o operador deve colocar o saco na zona de saída. Assim que estiver bem colocado o sistema deteta a sua presença e só após esta verificação é que a queda dos *pellets* começa.

DP_{3,3,2,4} – Sistema de fixação dos sacos

O silo de armazenamento, o tubo de saída e o sistema de fixação podem ser observados na Figura 5.66.



Figura 5.66 - Mecanismo de ensacamento (15 kg)

Uma funcionalidade interessante presente neste equipamento é a possibilidade de definir a automatização da pesagem dos *pellets*. O operador responsável tem acesso a um painel de controlo onde pode escolher o modo automático ou o modo manual.

No modo automático o transportador está constantemente a funcionar, sendo que existem paragens quando o silo é preenchido com os 15 kg. Uma vez que estes são ensacados e o tubo de saída fechado o silo é reabastecido automaticamente.

No modo manual o transportador só irá transportar 15 kg, sendo que a sua paragem quando chega a esse valor é permanente. Geralmente esta opção é utilizada no final da produção, para ensacar o último saco sem que o silo de armazenamento fique com *pellets* no seu interior.

Na Figura 5.66 pode ser observado o transportador na zona superior, bem como as ligações das células de carga. Pode-se ver o silo de armazenamento e o tubo de saída dos pellets. O pneumático situado lateralmente ao silo faz parte do sistema de fixação dos sacos.

Finalmente pode ser obtida a equação de projeto deste equipamento.

$$\begin{bmatrix} FR_{3,3,2,1} \\ FR_{3,3,2,2} \\ FR_{3,3,2,3} \\ FR_{3,3,2,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,3,2,1} \\ DP_{3,3,2,2} \\ DP_{3,3,2,3} \\ DP_{3,3,2,4} \end{bmatrix} \quad [5.21]$$

Esta equação é muito semelhante à obtida no mecanismo de ensacamento de *big bags*. Apresentando uma única diferença: a definição do $DP_{3,3,2,4}$ que garante a satisfação do $FR_{3,3,2,4}$, cujo equivalente no mecanismo de ensacamento em *Big Bags* fica por satisfazer.

5.4.5 $DP_{4,1,1}$ – Estrutura do silo (estilha)

A primeira fase do projeto do silo passa por saber de que forma este vai ser alimentado. No caso do silo de estilha a alimentação é feita recorrendo a empilhadores que transportam a matéria-prima até ao interior do silo, depositando-o na zona superior. Podem-se assim definir o FR e DP iniciais:

FR_{4,1,1,1} – Receber a matéria-prima

DP_{4,1,1,1} – Zona superior aberta (Figura 5.67)



Figura 5.67 - Silo de estilha

Nesta fase, ter a zona superior do silo aberta não causa problemas, pois o material ainda tem dimensões e teor de humidade elevados, não sendo problemático em termos de levantamento de poeiras ou desperdício de material.

O armazenamento de matéria-prima é o requisito básico do silo, porém não deve deixar de ser representado nos FRs deste nível.

FR_{4,1,1,2} – Armazenar a matéria-prima

DP_{4,1,1,2} – Zona lateral e inferior do silo

Este silo foi projetado internamente na empresa, sendo dos únicos equipamentos que não é comprado a uma empresa fabricante de equipamentos relacionados com a produção de *pellets*. Por esta razão apresenta uma diferença simples, porém de imensa importância no projeto de silos de estilha.

Um problema habitual nestes silos é acumulação de material na zona superior. O sistema de alimentação da linha funciona na zona inferior do silo, sendo que movimentava o material nesta zona. Devido às características da estilha, muitas vezes esta pode ficar comprimida na zona média do silo, sendo que a zona de alimentação irá ficar sem material, interrompendo o fluxo para a linha. Na maioria dos projetos de silo, este problema não é sequer considerado, sendo que quando ocorre, a solução passa pela intervenção manual. Para evitar este tipo de atuações inicialmente é definido o FR:

FR_{4,1,1,3} – Evitar a acumulação de material no silo

Para que o material se mova dentro do silo de forma natural e que não haja acumulação indesejada, foi criado um DP simples, mas que faz toda a diferença no funcionamento do silo:

DP_{4,1,1,3} – Inclinação do silo

Ao inserir uma inclinação a todo o conjunto, de forma a que a própria gravidade encaminhe o material para a zona de saída, garante-se que o material não ficará acumulado no silo.

Mesmo que por ação das plataformas de alimentação (equipamentos que serão analisados no subcapítulo seguinte) o material seja empurrado para o interior do silo, a inclinação fará com que não tenha a tendência de lá permanecer.

Uma vez definidos os FRs e DPs pode ser feita a análise de como estes se relacionam entre si e avaliar a qualidade do projeto, iniciando pela definição da equação de projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{4,1,1,1} \\ FR_{4,1,1,2} \\ FR_{4,1,1,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{4,1,1,1} \\ DP_{4,1,1,2} \\ DP_{4,1,1,3} \end{bmatrix} \quad [5.22]$$

Este é um equipamento simples que foi projetado especificamente para a empresa.

A problemática da acumulação de material no interior do silo e conseguinte inclinação para servir de solução são produtos da experiência do engenheiro responsável pela linha de produção. É muito interessante observar como a teoria axiomática de projeto deteta o problema como sendo um requisito funcional que de outra forma não seria respeitado.

Em suma trata-se de um projeto totalmente desacoplado, respeitando assim o Axioma da Independência.

5.4.6 DP_{4,3,1} – Estrutura do silo (silo 1, silo 2, silo 3)

A estrutura dos silos 1, 2 e 3 (que contêm serrim com diferentes níveis de dimensão e teor de humidade), é em tudo semelhante a estrutura do silo de estilha, sendo que os “Requisitos Funcionais” e “Parâmetros de Projeto” são iguais em certos casos.

São então definidos desde já, sendo que já foram anteriormente explicados (capítulo 5.4.5). Os “Requisitos Funcionais” são os seguintes:

FR_{4,3,1,1} – Armazenar a matéria-prima

FR_{4,3,1,2} – Evitar a acumulação de material no silo

E os “Parâmetros de Projeto” os seguintes:

DP_{4,3,1,1} – Zona lateral e inferior do silo

DP_{4,3,1,2} – Inclinação do silo

O primeiro requisito funcional que irá ser analisado em pormenor neste subcapítulo será relacionado com as características do material.

Devido às pequenas dimensões (e no caso do silo 3 o baixo teor de humidade) do material, o silo não poderá ter a zona superior aberta para que o fornecimento de material seja feito. Para além disso estes silos situam-se a meio do processo, pelo que o material será transportado para o seu interior por intermédio de transportadores e não por operadores.

Todas estas condicionantes levam a que os silos sejam fechados na zona superior como pode ser observado na Figura 5.68.



Figura 5.68 - Silo de serrim

Por a zona superior ser fechada não é possível fazer com que o material seja igualmente distribuído pelo interior do silo quando é depositado. Contrariamente ao que acontecia no silo de estilha onde o operador deposita a estilha de forma a que haja uma distribuição uniforme. Fica então visível a necessidade de um novo requisito funcional.

FR_{4,3,1,3} – Distribuir o material uniformemente pelo silo

Esta distribuição é garantida montando um transportador sem fim com uma ranhura na zona inferior do seu tubo. Este sem fim é montado na zona superior do silo e os transportadores de material proveniente de fases anteriores do processo depositam o material na sua extremidade.

É importante que a ranhura do sem fim não tenha dimensões exageradas, para que o material seja forçado a percorrer uma distância maior e desta forma seja distribuído de melhor forma.

DP_{4,3,1,3} – Sem-fim de distribuição

É possível observar o motor do sem-fim na zona superior da Figura 5.68. Nesta figura ainda se pode observar que no sistema de alimentação a zona superior foi coberta, isto acontece pela mesma razão da adição da cobertura de topo: nestes silos o material ao ser movido é propenso a levantar poeira que pode ser prejudicial para o ambiente e para os operadores, para além de representar um gasto de material.

Por isso também serão adicionados o requisito funcional e o parâmetro de projeto respetivo.

FR_{4,3,1,4} – Evitar o levantamento de poeiras

DP_{4,3,1,4} – Coberturas superiores

Por fim pode ser feita a análise dos FRs e DPs quanto às suas relações na equação de projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{4,3,1,1} \\ FR_{4,3,1,2} \\ FR_{4,3,1,3} \\ FR_{4,3,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{4,3,1,1} \\ DP_{4,3,1,2} \\ DP_{4,3,1,3} \\ DP_{4,3,1,4} \end{bmatrix} \quad [5.23]$$

Se o projeto do silo tiver em conta a necessidade da inclinação não afetar a distribuição de material em estado de repouso, pode-se chegar à conclusão de que se trata de um projeto desacoplável, onde a única relação indesejável será relacionada com o facto de o sem fim de distribuição também ajudar a evitar acumulações de material já que o distribui a uma altura uniforme.

5.4.7 DP_{5,2,3} – Estação de lavagem de gases

Uma vez feita a secagem do material, existem 2 *outputs* deste processo: o material devidamente seco, e o ar saturado de madeira. O material será levado para as fases seguintes do processo, mas o ar saturado terá de ser separado e devidamente filtrado.

Por ação de um ventilador o ar é levado até uma estação de limpeza de gases como já foi visto anteriormente, neste subcapítulo irá ser feita a análise a essa estação de limpeza de gases. Obviamente a limpeza do ar saturado de madeira será o primeiro requisito funcional, isto requer uma análise aos componentes deste ar.

O que entra no secador é um fluxo de ar quente, que irá absorver a humidade do material e consequentemente ficar saturado com partículas de madeira. Pode-se então concluir que o ar que sai do secador é uma mistura de vapor de água com partículas de madeira.

O vapor de água é perfeitamente seguro para ser lançado diretamente para a atmosfera sem perigo de poluição, logo, o trabalho da estação de limpeza será filtrar as partículas de madeira presentes no ar de escape do secador. O primeiro requisito funcional será então relacionado com a separação destas partículas.

FR_{5,2,3,1} – Separar as partículas de madeira do vapor de água

É importante notar que as partículas de madeira não são um gás, mas sim partículas sólidas de muito pequenas dimensões que se encontram em suspensão no ar de escape do secador. A separação destas partículas do vapor de água dá-se (no caso da estação de lavagem em questão) por colisão destas mesmas partículas com gotas de água provenientes de aspersores no interior da estação.

DP_{5,2,3,1} – Aspersores

A estação utilizada na empresa tem a geometria apresentada na Figura 5.69.

As dimensões desta estação são cerca de 5 metros de comprimento por 2.3 metros de largura, sendo que este é um pequeno espaço para que todas as partículas de madeira sejam separadas convenientemente do vapor de água, por isso outro requisito funcional será baseado na necessidade de prolongar o tempo de passagem de ar na estação.



Figura 5.69 - Estação de limpeza de gases

FR_{5,2,3,2} – Prolongar o tempo de passagem do ar na estação de limpeza

Não sendo conveniente alargar o comprimento da estação, opta-se por fazer com que os gases sejam obrigados a circular no interior da estação por uma espécie de “labirinto”, formado por várias placas verticais. O ar será forçado então a contornar estas placas, sendo que existem aspersores de água ao longo de toda a estação, fazendo assim com que a separação seja feita convenientemente.

DP_{5,2,3,2} – Placas verticais

Para que seja mais fácil a compreensão do funcionamento no interior da estação, e como é impossível obter imagens do interior real da mesma, foi feito um esquema da passagem do fluxo de ar no secador na Figura 5.70.

As setas a vermelho representam o fluxo de ar, enquanto que os círculos a verde representam os aspersores. Esta é apenas uma representação simplificada, sendo que o sistema em si não terá o mesmo número de aspersores ou a disposição dos mesmos.

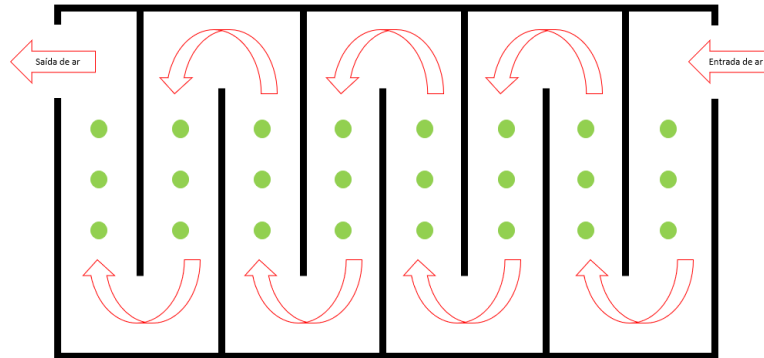


Figura 5.70 - Esquema de funcionamento da lavagem de gases

É importante notar que apesar de todos os passos anteriores para proceder à separação das partículas, pode acontecer que algumas ainda possam escapar, por isso deve ser considerado um requisito funcional adicional.

FR_{5,2,3,3} – Garantir a total filtragem de partículas

Para isto, antes do vapor de água ser libertado para a atmosfera deve passar por um filtro fino de rede para que as possíveis partículas remanescentes possam ser filtradas corretamente.

DP_{5,2,3,3} – Filtro de rede à saída

Continuando a consideração do vapor de água à saída, é ainda necessário projetar uma forma de efetuar o escape do vapor de água para a atmosfera.

FR_{5,2,3,4} – Proceder ao escape do vapor de água

Este escape é garantido por uma chaminé no final da estação, é importante que esta tenha uma grande altura, pois o vapor de água proveniente da estação é denso, sendo que se escapar a altura demasiado baixa pode ser prejudicial para os operadores e equipamentos na zona circundante.

DP_{5,2,3,4} – Chaminé (Figura 5.71)

Pode-se ainda observar na figura ao lado que a chaminé está fixa por cabos de aço e tem ainda uma plataforma numa zona média para que possa ser feita manutenção regular, este é um ponto importante em qualquer projeto de componentes mecânicos.

Por fim terá de ser feita a correta eliminação das partículas de madeira que agora estão em suspensão na água que fica dentro da estação de limpeza.

Esta água saturada de madeira terá de ser retirada do equipamento e depositada em algum local até ser feita a recolha e eliminação por uma entidade exterior à empresa.

FR_{5,2,3,5} – Armazenar a água saturada de madeira proveniente da lavagem

A água saturada de madeira é retirada do equipamento utilizando um tubo na zona inferior da lavagem. Como a água está em constante movimento (por ação do fluxo de ar e dos aspersores), não existe deposição de material no fundo, e o escoamento da água saturada de madeira dá-se sem problema.

Esta água é então armazenada numa fossa que está a um nível mais baixo do que a estação, para que o escoamento se dê de forma natural sem necessidade de bombas (que teriam de ser especialmente projetadas para lidar com água saturada de madeira)

DP_{5,2,3,5} – Fossa

Finalmente pode ser elaborada a equação de projeto e feita a análise das relações entre os “Requisitos Funcionais” e os “Parâmetros de Projeto”:

$$\begin{bmatrix} FR_{5,2,3,1} \\ FR_{5,2,3,2} \\ FR_{5,2,3,3} \\ FR_{5,2,3,4} \\ FR_{5,2,3,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ \times & \times & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{5,2,3,1} \\ DP_{5,2,3,2} \\ DP_{5,2,3,3} \\ DP_{5,2,3,4} \\ DP_{5,2,3,5} \end{bmatrix} \quad [5.24]$$

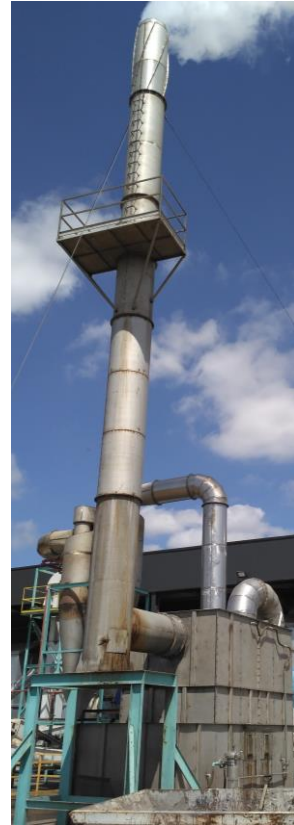


Figura 5.71 - Chaminé de escape de vapor de água

Este é um projeto claramente desacoplável. A forma de tornar este projeto totalmente desacoplado seria utilizar um equipamento em separado para filtrar as partículas remanescentes da lavagem.

Esta alteração é de difícil implementação real pois estas partículas existem em número muito reduzido e seria um custo que não acrescentaria suficiente valor para justificar a sua implementação.

5.4.8 Análise de nível

Por fim foram obtidos todos os FRs e DPs considerados relevantes para uma análise axiomática bem-sucedida. É possível então apresentar a enumeração de todos estes FRs e DPs como feito anteriormente.

- FR₁ – Preparar a matéria-prima para a peletização
 - FR_{1,1} – Separar fragmentos com dimensões inferiores a 15mm
 - FR_{1,1,1} - Separar a estilha crivada (dimensões < 3,5 mm)
 - FR_{1,1,2} - Separar aglomerados na matéria-prima
 - FR_{1,1,3} - Encaminhar o material longitudinalmente ao longo do cilindro
 - FR_{1,1,4} - Filtrar partículas metálicas
 - FR_{1,2} – Reduzir as dimensões do material para valores inferiores a 15 mm
 - FR_{1,2,1} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{1,2,2} – Separar componentes metálicos
 - FR_{1,2,3} – Separar pedras
 - FR_{1,2,4} – Triturar a matéria-prima
 - FR_{1,2,5} – Libertar partículas com dimensões < 15 mm
 - FR_{1,3} - Reduzir o teor de humidade da matéria-prima para valor <12 %
 - FR_{1,3,1} – Fornecer o caudal necessário de ar ao secador
 - FR_{1,3,2} – Fornecer temperatura ao fluxo de ar
 - FR_{1,3,2,1} – Alimentar a fornalha (material)
 - FR_{1,3,2,2} – Fornecer o caudal de ar adequado
 - FR_{1,3,2,3} – Expelir os gases de inceneração em excesso
 - FR_{1,3,2,4} – Filtrar o ar quente
 - FR_{1,3,3} – Movimentar o material
 - FR_{1,3,4} – Garantir a homogeneidade da secagem
 - FR_{1,3,4,1} – Encaminhar o material para o seu interior
 - FR_{1,3,4,2} – Movimentar o material consoante a rotação

- FR_{1,3,4,3} – Evitar a deposição de material
 - FR_{1,4} - Regularizar as dimensões da matéria-prima para cerca de 4 mm
 - FR_{1,4,1} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{1,4,2} – Separar componentes metálicos
 - FR_{1,4,3} – Triturar a matéria-prima
 - FR_{1,4,4} – Libertar partículas com dimensões < 4 mm
- FR₂ – Peletizar o material
 - FR_{2,1} – Conferir aos *pellets* diâmetros entre 6 e 8 mm
 - FR_{2,2} – Conferir aos *pellets* comprimento entre 3,15 e 40 mm
 - FR_{2,3} – Conferir aos *pellets* a consistência necessária.
 - FR_{2,4} – Regularizar o caudal de material à entrada
 - FR_{2,5} – Evitar a dispersão de *pellets* à saída
 - FR_{2,6} – Atenuar as forças de atrito entre o material e a matriz
- FR₃ - Preparar os *pellets* para expedição;
 - FR_{3,1} – Arrefecer os *pellets*
 - FR_{3,1,1} – Reduzir a temperatura dos *pellets*
 - FR_{3,1,2} – Armazenar os *pellets*
 - FR_{3,1,3} – Adequar o tempo de arrefecimento
 - FR_{3,2} – Remover os finos
 - FR_{3,2,1} – Separar aglomerados de finos dos *pellets*
 - FR_{3,2,2} – Encaminhar os dois materiais separadamente
 - FR_{3,2,3} – Movimentar o material ao longo do crivo
 - FR_{3,3} – Ensacar os *pellets*
 - FR_{3,3,1} – Ensacar os *pellets* em *Big Bags*
 - FR_{3,3,1,1} – Pesar os *pellets* a depositar
 - FR_{3,3,1,2} – Transportar os *pellets* até ao silo de pesagem
 - FR_{3,3,1,3} – Depositar os *pellets* armazenados
 - FR_{3,3,1,4} – Evitar a queda de *pellets* para o chão
 - FR_{3,3,2} – Ensacar os *pellets* em sacos de 15 kg
 - FR_{3,3,2,1} – Pesar os *pellets* a depositar
 - FR_{3,3,2,2} – Armazenar os *pellets* para ensacamento
 - FR_{3,3,2,3} – Depositar os *pellets* armazenados
 - FR_{3,3,2,4} – Evitar a queda de *pellets* para o chão
- FR₄ - Encaminhar o material entre processos
 - FR_{4,1} – Armazenar estilha

- FR_{4,1,1} – Armazenar a estilha
 - FR_{4,1,1,1} – Receber a matéria-prima
 - FR_{4,1,1,2} – Armazenar a matéria-prima
 - FR_{4,1,1,3} – Evitar a acumulação de material no silo
 - FR_{4,1,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,2} – Transportar estilha (3-10 cm / 50 % humid.)
 - FR_{4,2,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,2,2} – Movimentar a correia
 - FR_{4,2,3} – Adequar a altura da saída de material
 - FR_{4,3} – Armazenar serrim (verde)
 - FR_{4,3,1} – Armazenar serrim
 - FR_{4,3,1,1} – Armazenar a matéria-prima
 - FR_{4,3,1,2} – Evitar a acumulação de material no silo
 - FR_{4,3,1,3} – Distribuir o material uniformemente pelo silo
 - FR_{4,3,1,4} – Evitar o levantamento de poeiras
 - FR_{4,3,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,4} – Transportar serrim (verde) (10-15 mm/ 50% humid.)
 - FR_{4,5} – Armazenar serrim (seco)
 - FR_{4,5,1} – Armazenar serrim
 - FR_{4,5,1,1} – Armazenar a matéria-prima
 - FR_{4,5,1,2} – Evitar a acumulação de material no silo
 - FR_{4,5,1,3} – Distribuir o material uniformemente pelo silo
 - FR_{4,5,1,4} – Evitar o levantamento de poeiras
 - FR_{4,5,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,6} – Transportar serrim (seco) (10-15 mm/ 12% humid.)
 - FR_{4,6,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,6,2} – Inserir velocidade angular na rosca
 - FR_{4,6,3} – Isolar o local de movimento de material
 - FR_{4,6,4} – Evitar deposição de material à saída
 - FR_{4,7} – Armazenar matéria-prima final
 - FR_{4,7,1} – Armazenar matéria-prima final
 - FR_{4,7,1,1} – Armazenar a matéria-prima
 - FR_{4,7,1,2} – Evitar a acumulação de material no silo
 - FR_{4,7,1,3} – Distribuir o material uniformemente pelo silo
 - FR_{4,7,1,4} – Evitar o levantamento de poeiras

- FR_{4,7,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,8} – Transportar matéria-prima final (4mm / 12% humid.)
 - FR_{4,8,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,8,2} – Inserir velocidade angular na rosca
 - FR_{4,8,3} – Isolar o local de movimento de material
 - FR_{4,8,4} – Evitar deposição de material à saída
 - FR_{4,9} – Armazenar *pellets*
 - FR_{4,9,1} – Armazenar *pellets*
 - FR_{4,9,2} – Alimentar a linha de produção
 - FR_{4,10} – Transportar *pellets*
 - FR_{4,10,1} – Movimentar o material
 - FR_{4,10,2} – Movimentar a correia
 - FR_{4,10,3} – Adequar a altura da saída de material
- FR₅ - Filtrar ar
 - FR_{5,1} – Filtrar o ar à saída dos moinhos
 - FR_{5,1,1} – Separar as partículas de maior dimensão do pó
 - FR_{5,1,2} – Separar o pó do ar de escape
 - FR_{5,1,3} – Movimentar o material à saída
 - FR_{5,1,4} – Misturar o pó com o material de maiores dimensões
 - FR_{5,2} – Filtrar o ar à saída do secador
 - FR_{5,2,1} – Filtrar o ar de fragmentos de madeira
 - FR_{5,2,2} – Encaminhar os fragmentos filtrados de volta à linha
 - FR_{5,2,3} – Limpar a madeira em excesso dos gases de escape
 - FR_{5,2,3,1} – Separar as partículas de madeira do vapor de água
 - FR_{5,2,3,2} – Prolongar o tempo de passagem do ar na estação de limpeza
 - FR_{5,2,3,3} – Garantir a total filtração de partículas
 - FR_{5,2,3,4} – Proceder ao escape do vapor de água
 - FR_{5,2,3,5} – Armazenar a água saturada de madeira proveniente da lavagem
- FR₆ - Prevenir o acontecimento de incêndios
 - FR_{6,1} – Detetar faíscas
 - FR_{6,2} – Humedecer material afetado
 - FR_{6,3} – Retirar o material da linha

- FR_{6,3,1} – Remover o material do canal de distribuição
- FR_{6,3,2} – Retirar o material da zona circundante
- FR_{6,3,3} – Armazenar o material afetado (em zona segura)

Enumeram-se também os “Parâmetros de Projeto” da mesma forma:

- DP₁ – Sistema de preparação de matéria-prima
 - DP_{1,1} – Crivo rotativo
 - DP_{1,1,1} – Orifícios da matriz cilíndrica
 - DP_{1,1,2} – Velocidade angular do cilindro
 - DP_{1,1,3} – Inclinação do cilindro
 - DP_{1,1,4} – Magneto permanente
 - DP_{1,2} – Moinho de martelos (verdes)
 - DP_{1,2,1} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{1,2,2} - Magneto permanente
 - DP_{1,2,3} – *Stone Trap*
 - DP_{1,2,4} – Martelos
 - DP_{1,2,5} – Tela
 - DP_{1,3} – Secador de tambor rotativo
 - DP_{1,3,1} – Ventilador
 - DP_{1,3,2} – Fornalha
 - DP_{1,3,2,1} – Sistema de alimentação de estilha
 - DP_{1,3,2,2} – Sistema de alimentação de pó de cortiça
 - DP_{1,3,2,3} – Conduas de entrada de ar
 - DP_{1,3,2,4} – Chaminé de escape
 - DP_{1,3,2,5} – Sistema de ciclones separadores
 - DP_{1,3,3} – Movimento de rotação
 - DP_{1,3,4} – Estrutura do secador
 - DP_{1,3,4,1} – Rosca de entrada
 - DP_{1,3,4,2} – Saliências do secador
 - DP_{1,3,4,3} – Chanfros e conicidade na zona média
 - DP_{1,3,5} – Intervenção de operadores
 - DP_{1,4} – Moinho de martelos (secos)
 - DP_{1,4,1} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{1,4,2} - Magneto permanente
 - DP_{1,4,3} – Martelos

- DP_{1,4,4} – Tela
- DP₂ – Prensa peletizadora
 - DP_{2,1} – Matriz de peletização
 - DP_{2,2} – Pente de corte
 - DP_{2,3} – Rolos da prensa
 - DP_{2,4} – Sem-fim
 - DP_{2,6} – Jatos de vapor de água
- DP₃ – Sistema de pós-produção
 - DP_{3,1} – Arrefecedor
 - DP_{3,1,1} - Fluxo de ar frio
 - DP_{3,1,2} – Estrutura do arrefecedor
 - DP_{3,1,3} – Sistema sensor/válvula
 - DP_{3,2} – Crivo vibratório
 - DP_{3,2,1} -Movimento vibratório
 - DP_{3,2,2} – Plataforma perfurada
 - DP_{3,2,3} – Inclinação
 - DP_{3,3} – Sistema de ensacamento
 - DP_{3,3,1} – Mecanismo de ensacamento em *Big Bags*
 - DP_{3,3,1,1} – Silo de pesagem (células de carga)
 - DP_{3,3,1,2} – Transportador de correia
 - DP_{3,3,1,3} – Porta e tubo de saída
 - DP_{3,3,2} – Mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg
 - DP_{3,3,2,1} – Transportador de correia (com células de carga)
 - DP_{3,3,2,2} – Silo de armazenamento
 - DP_{3,3,2,3} – Porta e tubo de saída
 - DP_{3,3,2,4} – Sistema de fixação dos sacos
- DP₄ - Sistema de distribuição
 - DP_{4,1} – Silo de estilha
 - DP_{4,1,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,1,1,1} – Zona superior aberta
 - DP_{4,1,1,2} – Zona lateral e superior do silo
 - DP_{4,1,1,3} – Inclinação do silo
 - DP_{4,1,2} – Sistema de alimentação
 - DP_{4,2} – Transportador de correia

- DP_{4,2,1} – Correia transportadora
 - DP_{4,2,2} – Sistema de rolos
 - DP_{4,2,3} – Inclinação do transportador
- DP_{4,3} – Silo de serrim (1)
 - DP_{4,3,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,3,1,1} – Zona lateral e inferior do silo
 - DP_{4,3,1,2} – Inclinação do silo
 - DP_{4,3,1,3} – Sem-fim de distribuição
 - DP_{4,3,1,4} – Coberturas superiores
 - DP_{4,3,2} – Sistema de alimentação
- DP_{4,4} – Transportador pneumático
- DP_{4,5} – Silo de serrim (2)
 - DP_{4,5,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,5,1,1} – Zona lateral e inferior do silo
 - DP_{4,5,1,2} – Inclinação do silo
 - DP_{4,5,1,3} – Sem-fim de distribuição
 - DP_{4,5,1,4} – Coberturas superiores
 - DP_{4,5,2} – Sistema de alimentação
- DP_{4,6} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{4,6,1} – Rosca helicoidal
 - DP_{4,6,2} – Motor
 - DP_{4,6,3} – Estrutura exterior
 - DP_{4,6,4} – Inclinação do conjunto
- DP_{4,7} – Silo (3)
 - DP_{4,7,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,5,1,1} – Zona lateral e inferior do silo
 - DP_{4,5,1,2} – Inclinação do silo
 - DP_{4,5,1,3} – Sem-fim de distribuição
 - DP_{4,5,1,4} – Coberturas superiores
 - DP_{4,7,2} – Sistema de alimentação
- DP_{4,8} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{4,8,1} – Rosca helicoidal
 - DP_{4,8,2} – Motor
 - DP_{4,8,3} – Estrutura exterior
 - DP_{4,8,4} – Inclinação do conjunto

- DP_{4,9} – Silo de *pellets*
 - DP_{4,9,1} – Estrutura do silo
 - DP_{4,9,2} – Sistema de alimentação
- DP_{4,10} – Transportador de correia
 - DP_{4,10,1} – Correia transportadora
 - DP_{4,10,2} – Sistema de rolos
 - DP_{4,10,3} – Inclinação do transportador
- DP₅ - Sistema de filtragem e reaproveitamento
 - DP_{5,1} – Sistema de filtragem de ar (moinhos)
 - DP_{5,1,1} – Ciclone
 - DP_{5,1,2} – Filtro de mangas
 - DP_{5,1,3} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{5,1,4} – Posicionamento dos equipamentos
 - DP_{5,2} – Estação de limpeza e filtragem de gases
 - DP_{5,2,1} – Sistema de ciclones separadores
 - DP_{5,2,2} – Transportador de parafuso sem-fim
 - DP_{5,2,3} – Estação de lavagem de gases
 - DP_{5,2,3,1} – Aspersores
 - DP_{5,2,3,2} – Placas verticais
 - DP_{5,2,3,3} – Filtro de rede à saída
 - DP_{5,2,3,4} – Chaminé
 - DP_{5,2,3,5} – Fossa
- DP₆ - Sistema de detecção e extinção de incêndios
 - DP_{6,1} – Sensor de faíscas
 - DP_{6,2} – Aspersores
 - DP_{6,3} – Sistema de remoção de material
 - DP_{6,3,1} – Válvula de descarga
 - DP_{6,3,2} – Transportador de correia
 - DP_{6,3,3} – Bloco de descarga

Nesta fase foram feitas todas as decomposições consideradas pertinentes para uma análise bem-sucedida. Foram determinados em cada nível:

- Nível 1 – 6 FRs e 6 DPs
- Nível 2 – 28 FRs e 27 DPs
- Nível 3 – 60 FRs e 60 DPs

- Nível 4 – 35 FRs e 35 DPs

Ao todo foram analisados 129 FRs e 128 DPs até ao quarto nível de decomposição em *zigzag*, podendo ser observadas várias situações interessantes de uma perspectiva axiomática. Foram obtidos projeto acoplados, desacoplados e desacopláveis, projetos que utilizam redundância para satisfazerem os “Requisitos Funcionais” e alguns projetos que não respeitam todos os FRs.

Uma conclusão rápida do projeto é que apesar de não ter sido projetado inicialmente considerando a Teoria Axiomática de Projeto, este apresenta características bastante positivas relativamente ao Axioma de Independência. A maioria dos equipamentos apresenta matrizes de projeto desacopláveis.

A linha de produção, no entanto, apresenta alguns problemas e possibilidades de melhoria, que não foram abordados imediatamente neste capítulo. Todas as situações de projeto indesejáveis (projetos acoplados, projetos que não respeitam todos os “Requisitos Funcionais” e até projetos desacopláveis que apresentam demasiadas relações fora da diagonal) vão ser analisadas no próximo capítulo.

6 Oportunidades de Melhoria

Ao longo do capítulo anterior foi desenvolvida a análise axiomática completa do projeto da linha de produção. Algumas das equações de projeto obtidas apresentaram projetos acoplados ou desacopláveis com demasiadas relações fora da diagonal.

Neste capítulo, todos os casos de projetos como os referidos anteriormente vão ser analisados para que possam ser melhorados e dessa forma aumentar a produtividade ou a facilidade de manutenção do equipamento.

6.1 Rolamentos

Ao analisar visualmente a linha de produção notou-se um fenómeno que pode influenciar negativamente o tempo de vida e normal funcionamento dos rolamentos em funcionamento na linha de produção. Esta é a única oportunidade de melhoria que não foi obtida da análise axiomática, no entanto, achou-se pertinente incluí-la neste capítulo.

O problema reside na acumulação de pó de madeira nas chumaceiras. Uma vez que o material que está a ser transportado pode ter dimensões muito baixas, este tende a escapar do transportador e acumular-se em superfícies. Esta é uma das razões pelas quais a linha deve ser limpa regularmente, já que estas acumulações representam um perigo de incêndio e de explosão.

A acumulação da qual se fala neste subcapítulo é especificamente nas chumaceiras dos rolamentos, como se pode observar na Figura 6.1



Figura 6.1 - Chumaceira com acumulação de pó

Pode-se observar que o comportamento do rolamento irá ser afetado, pois apesar de serem escolhidos rolamentos com características especiais para garantir a estanquicidade do mesmo, o

material com o qual se está a lidar tem dimensões muito baixas, e está depositado em grandes quantidades na zona lateral do rolamento, podendo assim reduzir o tempo de vida do mesmo ou até pôr em causa o seu correto funcionamento.

Analisando o caso sob uma perspetiva axiomática, podem-se tirar algumas conclusões interessantes para a resolução deste problema. Define-se então que o mecanismo a analisar será a chumaceira, já que a alteração do projeto de rolamentos se torna difícil por serem um equipamento de alta precisão e obtido a partir de fornecedores.

O primeiro requisito funcional de uma chumaceira será sempre relacionado com garantir as condições de funcionamento necessárias para o rolamento, nomeadamente o aperto e o posicionamento. Também deverá garantir o acesso exterior aos canais de lubrificação do rolamento para que a manutenção periódica seja feita.

FR₁ – Garantir o aperto necessário para o rolamento

FR₂ – Garantir o posicionamento correto do rolamento

FR₃ – Garantir a possibilidade de lubrificação do rolamento

Por último, e uma vez que o material a transportar tem as características anteriormente referidas, a chumaceira também deverá garantir a proteção do rolamento de possíveis agentes contaminantes.

FR₄ – Proteger o rolamento de agentes contaminantes

Uma vez encontrados os “Requisitos Funcionais” destas chumaceiras, procede-se à determinação dos “Parâmetros de Projeto” que os satisfazem.

O aperto e o posicionamento são garantidos pela geometria e toleranciamento do rolamento e do local onde este é montado.

DP₁ – Toleranciamento dimensional

DP₂ – Toleranciamento geométrico

Já a lubrificação dos rolamentos é feita pela zona lateral dos mesmos, então relativamente à geometria da chumaceira, opta-se por garantir que a lateral do rolamento estará exposta.

DP₃ – Zona lateral da chumaceira aberta

Chegando a esta fase da análise, constata-se que não existe parâmetro de projeto para responder ao FR₄, dando origem a um projeto com 4 FRs e 3 DPs, que segundo o primeiro teorema

de Teoria Axiomática do Projeto (Anexo A), é considerado um projeto ou acoplado ou no qual um dos FRs não é respeitado, sendo que a última é a situação atual.

A solução passa pela criação de um novo DP que não influencie os anteriores FRs, mas que garanta a concretização do FR₄. Felizmente, uma observação cuidada da linha restante permitiu chegar a uma solução, já utilizada em outros mecanismos e que pode facilmente ser adaptada para o caso em questão.

Analisando a queda de material, nota-se que a grande acumulação se dá junto do “corpo” do equipamento, sendo esta a zona crítica. Noutros equipamentos a acumulação foi evitada separando a chumaceira do “corpo” do equipamento, como pode ser observado na Figura 6.2.



Figura 6.2 - Solução funcional para a acumulação de pó em chumaceiras

Neste caso foi adicionado um DP, relacionado com o posicionamento da chumaceira.

Apesar de resolver o problema apresentado, esta solução apresenta problemas relativos à sua implementação. O principal problema assenta no facto de todos os veios deverem ser aumentados. Isto significa uma desmontagem e possível redesenho dos rolos dos transportadores de correias levando a uma implementação difícil e de alto custo.

A forma mais fácil de proteger o rolamento e a chumaceira da acumulação de material passa por acrescentar uma proteção na zona acima da chumaceira. Outra opção seria soldar na estrutura uma caixa que envolvesse a chumaceira, com a zona lateral com possibilidade de abertura, para que o rolamento ficasse protegido, porém acessível para possíveis manutenções.

DP₄ – Caixa de proteção

Esta solução ainda não foi implementada, mas já existe uma improvisação do conceito recorrendo a uma chapa estrategicamente colocada, e os resultados são claramente positivos como se pode observar na Figura 6.3.



Figura 6.3 - Solução funcional 2

Desta forma o FR₄ já é respondido e pode assim ser desenhada a equação de projeto deste equipamento:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{bmatrix} \quad [6.1]$$

É interessante notar que o DP₃ afeta o FR₄, pois o facto de a superfície lateral ser aberta faz com que o rolamento não seja protegido tão eficazmente, e por essa razão o DP₄ vai ser fundamental para o correto funcionamento do equipamento.

Em conclusão, este é um projeto que não respeita todos os FRs neste momento, mas que com estas melhorias se pode tornar num projeto desacoplável, sendo proveitoso pois segundo o observado nas chumaceiras que respeitam o FR pode-se notar que o tempo de vida dos rolamentos duplica, reduzindo assim os custos de manutenção.

6.2 Prensa peletizadora

O projeto deste equipamento apresenta alguns problemas que irão ser abordados neste sub-capítulo. É pertinente então enumerar os FRs e DPs (Tabela 6.1), bem como representar a equação de projeto para analisar as problemáticas existentes.

Tabela 6.1 - Decomposição do FR₂

Requisitos Funcionais	“Parâmetros de Projeto”
FR_{2,1} – Conferir aos pellets diâmetros entre 6 e 8 mm	DP _{2,1} – Matriz de peletização
FR_{2,2} – Conferir aos pellets comprimento entre 3,15 e 40 mm	DP _{2,2} – Pente de corte
FR_{2,3} – Conferir aos pellets a consistência necessária	DP _{2,3} – Rolos da prensa
FR_{2,4} – Regularizar o caudal de material à entrada	DP _{2,4} – Sem-fim
FR_{2,5} – Evitar a dispersão dos pellets à saída	
FR_{2,6} – Atenuar as forças de atrito entre o material e a matriz	DP _{2,6} – Jatos de vapor de água

Sendo a equação de projeto:

$$\begin{bmatrix} FR_{2,1} \\ FR_{2,2} \\ FR_{2,3} \\ FR_{2,4} \\ FR_{2,5} \\ FR_{2,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{2,1} \\ DP_{2,2} \\ DP_{2,3} \\ DP_{2,4} \\ DP_{2,6} \end{bmatrix} \quad [6.2]$$

Podem-se então observar duas problemáticas neste projeto. A primeira é o facto de existir uma linha da matriz de projeto em branco. Isto é causado pela inexistência de um parâmetro de projeto para corresponder ao FR_{2,5}, fazendo com que este não seja garantido.

O segundo problema deste projeto é o facto de ser acoplado. Os “Requisitos Funcionais” referentes à consistência dos *pellets* (FR_{2,3}) e às forças de atrito (FR_{2,6}) são afetados pelos mesmos “Parâmetros de Projeto”, levando a um acoplamento, desrespeitando assim o Axioma da Independência.

Por serem duas situações muito distintas e as suas soluções não aparentarem ser de todo relacionadas, decidiu-se dividir as abordagens aos problemas por subcapítulos.

Uma vez que a questão do FR não respeitado irá com certeza levar à definição de um novo DP, optou-se por iniciar a proposta de melhoria neste ponto, prosseguindo então para a análise da matriz de projeto com o novo DP e só depois lidar com a questão do acoplamento.

6.2.1.1 Problemática da dispersão dos pellets à saída

A análise axiomática levou à conclusão de que um dos FRs do projeto não está a ser satisfeito. O requisito funcional em questão é o FR_{2,5} – Evitar a dispersão dos *pellets* à saída.

Como foi possível observar anteriormente, o chão na zona circundante da saída da prensa tem uma grande quantidade de *pellets* depositados. Este fenómeno ocorre devido à falta de uma estrutura que encaminhe os *pellets* da prensa para o transportador.

A zona de saída da prensa tem uma rampa (como pode ser observado na Figura 6.4), porém a velocidade a que os *pellets* são projetados à saída leva a que estes choquem com a rampa e sejam atirados para longe do transportador. Desta forma, a única estrutura que tem como objetivo o encaminhamento dos *pellets* à saída da prensa tem um funcionamento não satisfatório.



Figura 6.4 - Rampa de saída da prensa peletizadora

A solução para um projeto que não respeite um dos FRs devido ao baixo número de DPs passa por definir um novo parâmetro de projeto. Neste caso um que evite a dispersão dos *pellets* à saída da prensa. Foi então proposta uma solução temporária, que passa pela colocação de uma chapa na zona superior da rampa – Figura 6.5



Figura 6.5 - Solução temporária para dispersão de *pellets* (prensa à esquerda)

Notou-se uma redução significativa do número de pellets no chão, como se pode observar na figura acima, no entanto, esta solução não é considerada satisfatória a longo prazo. Para solucionar o problema deve ser projetada uma cobertura da zona de saída.

DP_{2,5} – Cobertura da zona de saída

Para que esta cobertura funcione da melhor maneira deve respeitar algumas considerações:

- Deve rodear toda a abertura da plataforma para que seja impossível que os *pellets* sejam projetados para fora do transportador;
- Deve ser fabricada com uma rede de malha de pequenas dimensões para que os *pellets* não possam passar, mas que permita aos operadores terem acesso visual à rampa de saída dos *pellets*;
- A sua montagem não deve ser definitiva, pois para a manutenção regular da câmara de peletização (dos rolos e das matrizes) será necessário abrir a zona frontal da prensa (Figura 6.6). Recomenda-se uma montagem aparafusada ou de encaixe.



Figura 6.6 - Exemplo de uma prensa aberta (à esquerda) e fechada (à direita)

Finalmente pode ser representada a equação de projeto incluindo a solução proposta:

$$\begin{bmatrix} FR_{2,1} \\ FR_{2,2} \\ FR_{2,3} \\ FR_{2,4} \\ FR_{2,5} \\ FR_{2,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{2,1} \\ DP_{2,2} \\ DP_{2,3} \\ DP_{2,4} \\ DP_{2,5} \\ DP_{2,6} \end{bmatrix} \quad [6.3]$$

A definição do $DP_{2,5}$ foi tal que este não afeta qualquer outro FR do projeto, levando a que este não contribua para o acoplamento do mesmo. Seguidamente será analisado este acoplamento para que possa ser eliminado levando a um projeto que respeite o Axioma de Independência.

6.2.1.2 Problemática do acoplamento

Existe um acoplamento no projeto da prensa devido à relação entre 2 FRs e 2 DPs. Os rolos da prensa e os jatos de vapor de água ($DP_{2,3}$ e $DP_{2,6}$) relacionam-se de igual forma com a redução das forças de atrito e com a consistência dos *pellets* ($FR_{2,3}$ e $FR_{2,6}$).

Nos moldes atuais, a consistência dos *pellets* é analisada periodicamente por um operador, que mediante essa análise regula a quantidade de vapor de água a ser incorporado na mistura à entrada da prensa e a velocidade de rotação na câmara de peletização. Por não existir uma leitura em tempo real e conseqüente ajuste de parâmetros, os *pellets* produzidos podem ter características menos boas em termos de consistência.

Obviamente não é possível fazer com que os rolos da prensa não desempenhem um papel importante nas forças de atrito geradas entre a matriz e o material, já que são estes que introduzem a força necessária à peletização. Por isso, a solução para este acoplamento passa por redefinir o $DP_{2,6}$ para que a introdução do vapor de água nunca possa alterar a consistência dos pellets.

O teor de humidade do material à entrada da prensa apresenta valores inferiores a 12 %, sendo este o valor limite para que a consistência dos pellets seja aceitável. Porém, a última leitura de teor de humidade é feita à saída do secador. Entre a secagem do material e a peletização ocorre um processo de trituração, que é responsável por uma pequena redução do teor de humidade (devido às altas temperaturas geradas na trituração do material).

Estes fatores fazem com que a introdução de vapor de água à entrada da prensa seja, não só possível, como recomendável (pois um teor de humidade demasiado baixo pode levar a problemas na aglomeração). No entanto, ao não existir uma leitura em tempo real do teor de humidade, a introdução de vapor de água a mais (ou a menos) pode representar um problema, e esta é a base do acoplamento observado.

O que se propõe para solucionar este problema é a implementação de um sistema que obtenha o valor de teor de humidade do material em tempo real, adicionando a quantidade de vapor de água consoante essa leitura. Este sistema serviria como substituto do DP_{2,6} ficando assim definido:

DP_{2,6}* - Sistema automático de jatos de vapor de água

O funcionamento deste sistema, para que solucione o acoplamento detetado, deve respeitar as seguintes considerações:

- A incorporação do vapor de água no material é feita no sem fim de alimentação das prensas, por isso a mistura homogénea poderá ser garantida por este sem fim. No entanto, deve ser feito um estudo alargado que considere a introdução de vapor de água e o funcionamento do sem fim e os relacione quanto ao aumento do teor de humidade do material em termos quantitativos.
- O teor de humidade do material deverá ser obtido em tempo real e imediatamente antes da sua introdução no sem fim de alimentação das prensas. Desta forma, consoante a leitura obtida, a quantidade de vapor de água poderá ser regulada de forma a ser obtido o valor ótimo de 12 % de teor de humidade.
- O teor de humidade do material nunca deverá exceder os 12 % à entrada para a prensa, para que o novo DP não se relacione de todo com o FR relativo à consistência dos *pellets*.

Se todas estas considerações forem respeitadas, será projetado um sistema que inclui um sensor para a obtenção do teor de humidade, colocado no transportador entre o moinho de secos e a prensa (a colocação de um silo de armazenamento entre estes equipamentos pode ser benéfica para que a leitura seja facilitada) e um sistema de jatos de vapor de água ligado ao sensor anteriormente falado, que ajusta automaticamente a quantidade de vapor consoante as leituras obtidas.

Poderá ser benéfico que este sistema também considere as leituras de consumo de energia dos motores responsáveis pela rotação da câmara de peletização. Desta forma, se por algum motivo o material tenha um teor de humidade demasiado elevado (causando mais resistência na sua aglomeração) o sistema poderá ajustar a rotação da câmara de peletização ou a introdução de vapor de água.

Desta forma poderá ser redefinida a equação de projeto anteriormente obtida, com os novos DPs obtidos neste capítulo - Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Decomposição do FR₂ - melhorado

Requisitos Funcionais	“Parâmetros de Projeto”
FR_{2,1} – Conferir aos pellets diâmetros entre 6 e 8 mm	DP _{2,1} – Matriz de peletização
FR_{2,2} – Conferir aos pellets comprimento entre 3,15 e 40 mm	DP _{2,2} – Pente de corte
FR_{2,3} – Conferir aos pellets a consistência necessária	DP _{2,3} – Rolos da prensa
FR_{2,4} – Regularizar o caudal de material à entrada	DP _{2,4} – Sem-fim
FR_{2,5} – Evitar a dispersão dos pellets à saída	DP _{2,5} – Cobertura na zona de saída
FR_{2,6} – Atenuar as forças de atrito entre o material e a matriz	DP _{2,6} [*] – Sistema automático de jatos de vapor de água

$$\begin{bmatrix} FR_{2,1} \\ FR_{2,2} \\ FR_{2,3} \\ FR_{2,4} \\ FR_{2,5} \\ FR_{2,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{2,1} \\ DP_{2,2} \\ DP_{2,3} \\ DP_{2,4} \\ DP_{2,5} \\ DP_{2,6}^* \end{bmatrix} \quad [6.4]$$

Com as melhorias propostas é possível transformar um projeto acoplado e que não satisfaz todos os seus FRs, num que para além de os respeitar, passa a desacoplável.

6.3 Secador de tambor rotativo

O secador de tambor rotativo pode ser melhorado, por isso usar-se-á a mesma estratégia que a utilizada no subcapítulo anterior. Na Tabela 6.3 estão enumerados os FRs e DPs e representada a equação de projeto.

Tabela 6.3 - Decomposição do FR_{1,3}

Requisitos Funcionais	“Parâmetros de Projeto”
FR_{1,3,1} – Fornecer o caudal necessário de ar ao secador	DP _{1,3,1} – Ventilador
FR_{1,3,2} – Fornecer temperatura ao fluxo de ar	DP _{1,3,2} – Fornalha
FR_{1,3,3} – Movimentar o material	DP _{1,3,3} – Movimento de rotação
FR_{1,3,4} – Garantir a homogeneidade da secagem	DP _{1,3,4} – Estrutura do secador
FR_{1,3,5} – Adequar o tempo de secagem à matéria-prima	DP _{1,3,5} – Intervenção de operadores

$$\begin{bmatrix} FR_{1,3,4} \\ FR_{1,3,2} \\ FR_{1,3,1} \\ FR_{1,3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \times & 0 & 0 & 0 \\ \times & 0 & \times & 0 & 0 \\ \times & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,3,5} \\ DP_{1,3,4} \\ DP_{1,3,2} \\ DP_{1,3,1} \\ DP_{1,3,3} \end{bmatrix} \quad [6.5]$$

Pode-se observar que a equação de projeto já se encontra ordenada de forma a que a matriz seja trapezoidal. Este projeto é então considerado desacoplável, no entanto, o número de relações fora da diagonal da matriz é muito elevado, e por isso a otimização deste projeto é dificultada.

Existe uma coluna quase inteiramente preenchida, o que indica que existe um DP que afeta a maioria dos FRs do sistema. Este parâmetro de projeto é o DP_{1,3,5} – Intervenção de operadores. Este processo não está de todo automatizado, e a matéria-prima utilizada apresenta uma grande

heterogeneidade no teor de humidade (pois pode ser usada uma grande variedade de madeira para a produção de *pellets*).

A intervenção dos operadores é constante. É feita uma verificação do teor de humidade do material à saída do secador a cada duas horas e consoante os valores obtidos o operador adequa o tempo de secagem.

A adequação do tempo de secagem é feita conjugando a velocidade de rotação do secador e a temperatura e caudal do fluxo de ar. O alto número de variáveis, associado ao facto de a sua otimização ser feita por um operador com base em conhecimento empírico levam a que erros na secagem sejam recorrentes.

A melhoria proposta terá como principal objetivo limitar a intervenção do operador, automatizando o processo, possivelmente introduzindo leituras de teor de humidade em tempo real, à entrada, saída, ou até no interior do secador, associadas a um sistema automático de ajuste de parâmetros. Este sistema viria substituir não só o DP_{1,3,5}, mas também o DP_{1,3,3} (Movimento de rotação), eliminando a rotação como parâmetro independente de secagem, fazendo com que este fosse definido consoante a atuação dos outros parâmetros (caudal e temperatura do fluxo de ar). Fica então proposta a criação de um novo DP, a eliminação de dois existentes e a consequente reorganização:

DP_{1,3,3}* - Estrutura do secador

DP_{1,3,4}* - Sistema de ajuste automático de parâmetros com leitura de teor de humidade em tempo real

Dadas as alterações feitas, os DPs serão reorganizados e a equação de projeto alterada como se pode observar seguidamente.

$$\begin{bmatrix} FR_{1,3,1} \\ FR_{1,3,2} \\ FR_{1,3,3} \\ FR_{1,3,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 & \times \\ 0 & 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix}$$

Para que este sistema automático funcione, têm de ser tomadas em conta algumas considerações:

- Terá de ser feito um estudo completo da influência conjunta do caudal e temperatura do ar no secador, bem como a rotação do mesmo, na redução do teor de humidade do serrim de 15 mm. É fundamental que se obtenha um algoritmo capaz de ajustar todos estes parâmetros para que a secagem seja feita corretamente.

- Terão de ser introduzidos sensores capazes de ler o teor de humidade do material à entrada e à saída do secador. Estes sensores vão fornecer a informação necessária ao algoritmo anteriormente referido para que a secagem seja feita corretamente.

6.4 Mecanismo de ensacamento em *Big Bags*

O mecanismo de ensacamento existente na linha de produção apresenta possibilidade de melhoria, e será analisado da mesma forma que os outros equipamentos neste capítulo. Na Tabela 6.4 estão enumerados os FRs e DPs do equipamento bem como a equação de projeto.

Tabela 6.4 - Decomposição do FR_{3,3,1}

Requisitos Funcionais	“Parâmetros de Projeto”
FR_{3,3,1,1} – Pesar os pellets a depositar	DP _{3,3,1,1} – Silo de pesagem (células de carga)
FR_{3,3,1,2} – Transportar os pellets até ao silo de pesagem	DP _{3,3,1,2} – Transportador de correia
FR_{3,3,1,3} – Depositar os pellets armazenados	DP _{3,3,1,3} – Porta e tubo de saída
FR_{3,3,1,4} – Evitar a queda de pellets para o chão	-

$$\begin{bmatrix} FR_{3,3,1,1} \\ FR_{3,3,1,2} \\ FR_{3,3,1,3} \\ FR_{3,3,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,3,1,1} \\ DP_{3,3,1,2} \\ DP_{3,3,1,3} \end{bmatrix} \quad [6.6]$$

Trata-se de um projeto simples, porém apresenta um problema grave. A presença de uma linha em branco indica que um dos FRs não está a ser cumprido. Não existe de momento nenhum parâmetro de projeto que evite a queda de *pellets* para o chão.

O ensacamento é feito por um operador que coloca o saco na zona de saída dos *pellets*, de seguida prime o botão para que a queda do material comece. A única problemática deste sistema é que não existe nenhum equipamento que garanta que o saco está corretamente colocado. Isto pode levar a que uma errada colocação do saco (ou total ausência do mesmo) possa causar o derrame de quilogramas de *pellets*.

Para solucionar este problema poderá ser utilizado um sistema semelhante ao existente no mecanismo de ensacamento em sacos de 15 kg. Este sistema consiste num pneumático que procede à fixação do saco. Uma vez que seja detetada a presença do saco e correta fixação, o sistema inicia a queda dos *pellets*. Se não existir um saco fixo na zona de saída, a queda não será permitida.

Esta solução, de uma perspectiva axiomática, equivale à definição de um novo DP:

DP_{3,3,1,4} – Sistema de fixação de sacos

Com a definição deste novo DP pode ser elaborada novamente a equação de projeto para perceber como se relaciona com todos os FRs do projeto.

$$\begin{bmatrix} FR_{3,3,1,1} \\ FR_{3,3,1,2} \\ FR_{3,3,1,3} \\ FR_{3,3,1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & \times \\ 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{3,3,1,1} \\ DP_{3,3,1,2} \\ DP_{3,3,1,3} \\ DP_{3,3,1,4} \end{bmatrix} \quad [6.7]$$

Conclui-se que o novo DP faz com que o processo se torne desacoplável. O sistema de fixação dos sacos afetará também a deposição dos pellets (FR_{3,3,1,3}) e essa relação faz com que o projeto não possa ser totalmente desacoplado, no entanto é uma situação mais satisfatória que a anterior em que um dos FRs não estaria a ser cumprido.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

A indústria produtora de *pellets*, apesar de ser relativamente nova, é muito semelhante às indústrias de tratamento de madeira e cortiça. Estas são áreas muito exploradas, sobretudo no panorama nacional, porém o projeto das linhas de produção permaneceu estagnado ao longo dos anos, assentando sobretudo em dados empíricos.

O projeto das linhas de produção de *pellets*, por ser mais recente, já considerou alguns fatores que melhoraram a produtividade em relação às indústrias das quais teve origem, porém, ainda são visíveis algumas fragilidades, sobretudo em relação à automatização do processo.

O projeto de uma linha de produção é complexo, e a consideração de dados empíricos como base para a sua definição não é de todo errado, sendo que muitas vezes é a única forma de conseguir iniciar o exercício de projetar, já que a informação disponível ao princípio do projeto é escassa. Porém, atualmente existem ferramentas que facilitam muito o ato de projetar, organizando todo o processo e revelando fragilidades que de outra forma poderiam passar despercebidas.

As ferramentas anteriormente referidas são nomeadamente as teorias e metodologias de projeto, que quando aplicadas em conjunto com o conhecimento empírico da área em questão, possibilitam a criação de bons projetos (neste caso linhas de produção).

No caso em estudo nesta tese (linha de produção de *pellets*) foi aplicada a Teoria Axiomática de Projeto. O objetivo fundamental foi a análise da conceção e funcionamento da linha de produção, para que fosse obtida uma maior compreensão tanto do projeto geral das linhas (os processos semelhantes entre todos os produtores), como das soluções encontradas a nível interno para a otimização do processo.

Foi feita a análise axiomática da linha produção até ao quarto nível, tendo sido determinados 129 FRs e 128 DPs (os DPs referentes a equipamentos “gerais” tais como ventiladores ou motores não foram analisados ao pormenor). Esta análise levou a conclusões interessantes, tanto a nível do projeto da linha como a nível de melhorias possíveis.

Relativamente à análise axiomática feita, foram retiradas conclusões interessantes tanto sobre a linha de produção em si, como da utilização da Teoria Axiomática de Projeto como ferramenta de análise de projetos previamente elaborados.

Ao longo do avanço entre níveis da análise, pode ser observado não só um aumento de FRs e DPs como também um aumento de relações entre eles, como é natural. No primeiro nível da análise foram determinados 6 FRs e 6 DPs, cuja equação de projeto é característica de um projeto desacoplado.

O primeiro nível da análise representa ainda uma fase muito precoce para se poderem retirar conclusões quanto à qualidade do projeto quanto ao Axioma de Independência da Teoria Axiomática de Projeto. Porém, a forma como este nível foi trabalhado, não só influenciou todo o trabalho seguinte, como permitiu retirar conclusões interessantes tais como:

- Todo o projeto da linha pode ser dividido em quatro campos distintos: a pré-produção, a produção, a pós-produção e os processos complementares
- A definição de um projeto desacoplado nesta fase da análise não infere sobre a qualidade do projeto em si, mas sim na qualidade da análise feita. Ao definir o nível “base” como sendo totalmente desacoplado, a restante análise fica facilitada por quase não existir relações fora das ramificações existentes.

No segundo nível da análise foram definidos 28 FRs e 27 DPs, e consequentemente aumentaram as relações entre estes, resultando num projeto acoplado já no segundo nível de análise. Nesta fase as ramificações derivadas dos 6 FRs definidos anteriormente levaram à definição de 5 subprojectos desacoplados (FR₁, FR₃, FR₄, FR₅, FR₆) e um projeto acoplado (FR₂). Porém, existem relações entre ramificações que fazem com que o projeto sofra de um acoplamento mais severo, estas situações são:

- O FR_{1,3}, referente à redução do teor de humidade do material ser influenciado pelos jatos de vapor de água utilizados na prensa (DP_{2,6}). Esta relação é parcialmente responsável pelo acoplamento do projeto nesta fase, contudo, desaparece se for utilizada a proposta de melhoria apresentada no capítulo 6.2.1.2.
- Os FR_{6,1}, FR_{6,2} e FR_{6,3}, que definem o projeto do sistema de deteção e extinção de incêndios, são influenciados pelos DP_{4,6} e DP_{4,8}, sendo estes os transportadores sem-fim utilizados no transporte do material com baixo teor de humidade. Estas relações devem-se à instalação dos equipamentos de extinção e deteção de incêndios nestes transportadores, fazendo com que o projeto dos mesmos seja influenciado. Esta relação só poderia ser evitada se a prevenção de incêndios fosse feita no exterior dos transportadores, o que traria sérios problemas de segurança e por isso aceita-se este acoplamento como necessário.

Chegando ao terceiro nível da análise obtiveram-se 60 FRs e 60 DPs, um aumento significativo, que se traduz no subcapítulo mais extenso da tese. É nesta fase que foram feitas a maior parte das análises dos equipamentos em concreto, sendo que nos níveis 1 e 2 foram analisados sobretudo sistemas (à exceção da prensa peletizadora).

É também nesta fase que se decidiu analisar as equações de projeto separadamente a partir das ramificações de primeiro nível. Esta decisão deve-se ao grande número de FRs e DPs, que se traduz numa matriz de projeto demasiado grande para que seja legível no formato A4. Por esta razão, as matrizes de projeto e esquemas de decomposição foram elaboradas para cada uma das ramificações definidas no primeiro nível, sendo que as matrizes estão representadas na análise de nível do nível 3 e as decomposições estão representadas nos anexos B1, B2, B3, B4, B5 e B6.

Também neste nível se puderam retirar algumas conclusões interessantes sobre o projeto da linha de produção:

- Existe um DP recorrente em vários equipamentos de linha ($DP_{1,1,4}$, $DP_{1,2,2}$, $DP_{1,4,2}$) referente a um magneto permanente responsável pela separação de componentes metálicos do material. Esta repetição pode parecer desnecessária, mas cumpre um propósito muito importante de uma perspetiva axiomática. Ao repetir este equipamento ao longo da linha, garante-se a independência do projeto sendo que cada um deste magneto permanente corresponde a FRs de diferentes ramificações do projeto. Se não fosse feita a repetição, os 3 FRs dependeriam de um só DP, levando sem dúvida a um projeto acoplado.
- O projeto, a partir deste nível, não apresenta relações fora das ramificações definidas, o que facilita muito a melhoria individual de equipamentos, pois podem ser trabalhados individualmente sem a preocupação de influenciar FRs de outras ramificações do projeto. Isto é uma indicação de um bom projeto, que respeita o Axioma da Independência.

Foi então feita a análise de quarto nível, traduzindo-se na definição de 35 FRs e 35 DPs. Nesta fase considerou-se que a análise chegou a um nível suficientemente profundo para que os objetivos propostos fossem assegurados. Resultou, não só num conhecimento alargado da linha de produção, como também em conclusões e propostas de melhoria pertinentes.

Do nível 4 da análise resultaram as seguintes conclusões:

- Uma vez analisados os dois equipamentos de ensacamento presentes na linha de produção, é possível observar que um deles apresenta um problema grave no cumprimento de um dos seus “Requisitos Funcionais” (o equipamento de ensacamento em *Big Bags* não evita a queda de *pellets* para o chão no momento do

ensacamento). Porém, esta problemática pode ser resolvida após a análise ao equipamento de ensacamento em sacos de 15 kg, uma vez que existe um mecanismo que evita a queda de *pellets* para o chão neste equipamento. A proposta de melhoria foi apresentada e esta situação é interessante pois demonstra que para solucionar um problema na área da engenharia, devem-se primeiro analisar as soluções existentes e só em casos específicos adaptar as soluções ou projetar novas para a resolução destes problemas.

- Pela primeira vez nesta análise pode-se analisar um projeto que recorre ao conceito da redundância para o cumprimento dos seus Requisitos Funcionais. Isto acontece no projeto da fornalha (DP_{1,3,2}), onde o FR_{1,3,2,1} é assegurado tanto pelo DP_{1,3,2,1} como pelo DP_{1,3,1,2}. Esta situação deriva da fornalha ser alimentada por dois tipos de material (madeira e cortiça) pelo que a redundância é a melhor forma de garantir que a alimentação não é afetada ou completamente interrompida pela falta de um dos componentes ou falha de um dos equipamentos.

Todos os sistemas e equipamentos da linha foram analisados profundamente, à exceção daqueles que não acrescentariam valor à dissertação pois não se relacionam diretamente com o tema a ser estudado (tais como ventiladores e motores). Foram também propostas 5 melhorias para a linha de produção que estão representadas no capítulo 6.

A área da engenharia é vasta, e na maior parte das vezes uma análise profunda de um tópico da mesma resulta não só em conclusões e propostas de melhoria, como também em oportunidades de trabalhos futuros para o avanço científico. Como tal, esta tese teve como objetivo a análise de uma linha de produção, e a sua elaboração revelou alguns tópicos interessantes para trabalhos futuros, tais como:

- A fornalha responsável pela temperatura do fluxo de ar no secador tem como combustível uma mistura de madeira com pó de cortiça. Apesar de ser notória a influência que a introdução do pó de cortiça na mistura tem na temperatura da combustão na fornalha, esta ainda é feita utilizando quantidades de material obtidas empiricamente. É interessante elaborar um estudo alargado da influência da introdução do pó de cortiça na combustão de madeira em fornalhas responsáveis pelo aumento de temperatura de fluxos de ar.
- No capítulo 6.2.1.2 foi proposta a introdução de um sistema automático de jatos de vapor de água, de forma a reduzir o atrito dentro da câmara de peletização, porém não aumentando o teor de humidade da mistura para valores superiores a 12%. Esta melhoria foi apresentada a um engenheiro da fábrica onde foi baseada toda a análise, e apesar de ter sido bem recebida em termos teóricos, foi rejeitada pois a

influência do vapor de água na mistura utilizada para a produção de *pellets* não é totalmente conhecida e a sua determinação é fundamental para o sucesso da implementação da melhoria. Por isso torna-se evidente o interesse na análise da influência de jatos de vapor de água no teor de humidade de fragmentos de madeira de dimensões inferiores a 4 mm. Este estudo, idealmente, levaria à criação de um algoritmo que fosse responsável pela automatização do sistema de introdução de vapor de água na mistura de material à entrada de prensas de peletização.

- A secagem do material num secador de tambor rotativo é alvo de muitas análises e estudos na comunidade científica. Porém, a introdução da leitura em tempo real do teor de humidade não é feita neste tipo de equipamentos. Seria interessante projetar um secador de tambor rotativo com capacidade de leitura em tempo real de teor de humidade, pelo menos na zona de saída do mesmo. Este projeto poderia levar à determinação da influência da rotação do tambor e da temperatura do fluxo de ar na secagem do material.

Resumidamente, a linha de produção de *pellets* analisada, apesar de ter sido projetada sem conhecimento dos princípios da Teoria Axiomática de Projeto, respeita em grande parte estes mesmos princípios, apresentados maioritariamente projetos desacopláveis. Os acoplamentos encontrados, bem como as problemáticas de projeto de diferentes tipos foram abordadas de forma a apresentar melhorias para o projeto da linha.

Bibliografia

- 911 Metallurgist. (7 de Junho de 2019). "*Hammer Mill Crusher and Grinder*". Obtido de <https://www.911metallurgist.com/blog/hammer-mill-working-principle>
- ANPEB. (2015). *Manual ENplus - Sistema de Certificação de Qualidade para Pellets de Madeira*. Bruxelas: European Pellet Council.
- ANPEB. (16 de Janeiro de 2019). *Normalização vs Certificação de qualidade | ANPEB*. Obtido de ANPEB | Associação Nacional de Pellets: <http://www.anpeb.pt/enplus/normalizacao-vs-certificacao-de-qualidade/>
- AZEUS. (7 de Junho de 2019). "*COUNTERFLOW PELLET COOLER*". Obtido de <https://www.fish-feed-extruder.com/product/counterflow-pellet-cooler.html>
- AZEUS. (7 de Junho de 2019). "*WATERDROP FEED HAMMER MILL*". Obtido de <https://www.fish-feed-extruder.com/product/fish-feed-hammer-mill.html>
- Barros, C. (2013). *Produção de Pellets para valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira*. Dissertação de mestrado para obtenção de grau de mestre em Engenharia Mecânica Braga: UMinho.
- BioEnergia. (7 de Junho de 2019). "*Queimadores Industriais de Pellet*". Obtido de <http://www.bioenergia.com.pt/images/gallery/queimadores/pv3501000.pdf>
- Bulk Inside. (7 de Junho de 2019). "*Milling Process*". Obtido de <https://bulksinside.com/milling-process/>
- CFCAI. (7 de Junho de 2019). "*LIMPADORES CALIBRADORES Emile MAROT*". Obtido de http://www.cfcai.com/MAROT/MAROT_BRA.htm
- Cobrimetal. (7 de Junho de 2019). "*Empresa roscas transportadoras*". Obtido de <http://www.cobrimetal.com.br/empresa-roscas-transportadoras>
- Cochran, D. S., & Reynal, V. A. (14 de Maio de 1996). *Axiomatic Design of Manufacturing Systems. The Lean Aircraft Initiative Report Series*.
- Cofelma. (7 de Junho de 2019). "*Helicoide laminado*". Obtido de <http://cofelma.com.br/produto/helicoide-laminado/>

- Ferreira, J. (2016). Otimização de uma Linha de Produção de Derivados de Madeira. Relatório de Projeto para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Coimbra: ISEC.
- Fradinho, J., Mourão, A., Gabriel-Santos, A., Cavique, M., & Gonçalves-Coelho, A. (13-19 de Novembro de 2015). An Axiomatic Design interpretation on the use of response surface methodology to solve coupled designs. *ASME 2015 IMECE*.
- Gonçalves Coelho, A., Mourão, A., & Pereira, Z. (2005). "Improving the use of QFD with Axiomatic Design". *Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol. 13 , No 3*, pp. 233-239.
- Gonçalves, E. (2016). Consumo Europeu de Pellets e suas variáveis explicativas. Tese de Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente. Porto: U.Porto.
- Gonçalves-Coelho, A. M., Neştian, G., Cavique, M., & Mourão, A. (2012). Tackling with Redundant Design Solutions Through Axiomatic Design. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 1837-1843.
- Leroy Merlin. (7 de Junho de 2019). "Salamandra a pellets FUSION BRANCA 8KW". Obtido de <http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos/Aquecimento-e-Climatizacao/Aquecimento-pellets-e-lenha/Salamandras-pellets/17928491.aspx>
- Lignetics. (7 de Junho de 2019). "BEAR MOUNTAIN BBQ® PECAN BBQ PELLETS". Obtido de <https://lignetics.com/products/pecan-bbq-pellets>
- Martins, D. (2018). Contributos para a conceção de uma unidade fabril de granulado de cortiça. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Monte de Caparica: FCT - NOVA.
- Maxton Engineering. (7 de Junho de 2019). "Rotary Dryer". Obtido de <https://briquettesolution.com/rotary-dryer/>
- Monteiro, E., Mantha, V., & Rouboa, A. (2012). Portuguese pellets market: Analysis of the production and utilization constrains. *Energy Policy*, 129-135.
- Nascak, I. D., Mikula, I. J., & Kerekanic, I. J. (2014). Co-current Drying in High-revolution Rotary Dryer. *European Scientific Journal*, 50-61.

- Palamatic Process. (7 de Junho de 2019). "*Rosca transportadora helicoidal*". Obtido de <https://www.palamaticprocess.com.br/maquinas-industriais/equipamentos-de-transporte/transporte-mecanico/rosca-transportadora-helicoidal>
- Palamatic Process. (7 de Junho de 2019). "*Rosca transportadora tubular*". Obtido de <https://www.palamaticprocess.com.br/maquinas-industriais/equipamentos-de-transporte/transporte-mecanico/rosca-transportadora-tubular>
- Park, G. -J. (2007). *Analytic Methods for Design Practice*. London: Springer-Verlag.
- PRONAR Recycling. (7 de Junho de 2019). "*RECYCLING EQUIPMENT RANGE*". Obtido de <http://pronar-recycling.com/wp-content/uploads/2017/10/pronar-recycling-en.pdf>
- ReginaCork. (20 de Janeiro de 2019). *Empresa: ReginaCork*. Obtido de Web site de Reginacork: <http://www.reginacork.pt/>
- Sai, P. S. (2013). Drying of Solids in a Rotary Dryer. *Drying Technology*, 213-223.
- Samuelsson, R., Burvall, J., & Jirjis, R. (2006). Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. *Biomass and Bioenergy*, 929-934.
- SEASUN Machinery. (7 de Junho de 2019). "*Rotary Drum Dryer*". Obtido de <http://www.briquetting-machine.com/rotary-drum-dryer.html>
- Silos CORDOBA. (7 de Junho de 2019). "*Que tipo de filtros se utilizam nas instalações de armazenagem de grãos e porquê*". Obtido de <https://siloscordoba.com/pt-br/blog-pt-br/armazenagem-de-graos/que-tipo-de-filtros-se-utilizam-nas-instalacoes-de-armazenagem-de-graos-e-porque/>
- Sinoder. (7 de Junho de 2019). "*Triple Pass Dryer*". Obtido de <http://www.sinoder.com/industrial-dryer/33.html>
- SOLERPALAU. (25 de Junho de 2019). "*Fichas Técnicas*". Obtido de http://www.solerpalau.ch/formacion_01_37_print.html
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 3285-3290.
- Suh, N.-P. (1990). *The principle of design*. Oxford University Press.

YinXing. (7 de Junho de 2019). *"Working principle of vibrating feeder and requirement for material"*. Obtido de <https://www.yxsieve.com/info/working-principle-of-vibrating-feeder-and-requ-28449732.html>

Anexo A

Axiomatic Design Axioms, Corollaries and Theorems

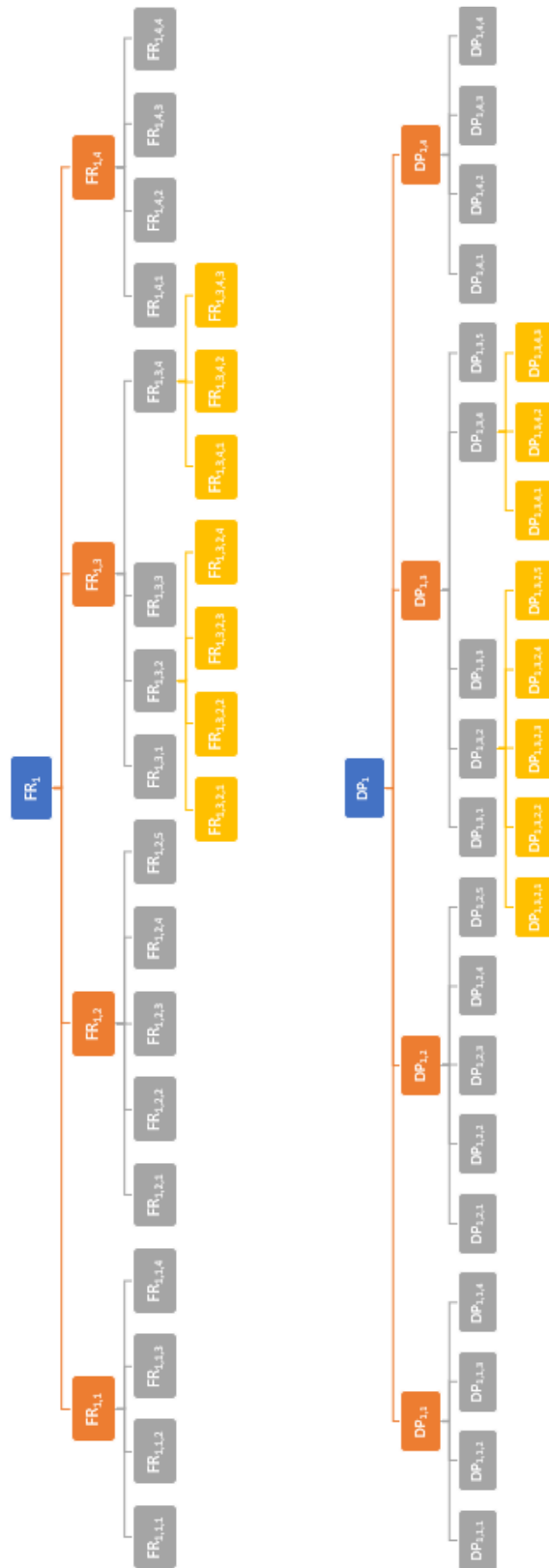
Axiom 1 (The independence axiom)	Maintain the independence of the functional requirements (FRs).
Axiom 2 (The information axiom)	Minimize the information content of the design.
Corollary 1 (Decoupling of coupled designs)	Decouple or separate parts or aspects of a solution if FRs are coupled or become 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.
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 uncoupled 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 $(\sum \partial FR_i \partial DP_j \Delta DP_j n_i \neq j, j=1)$ 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 requirements.
Theorem 10 (Modularity of independence measures)	Suppose that a design matrix [DM] can be partitioned 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 nonzero 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.

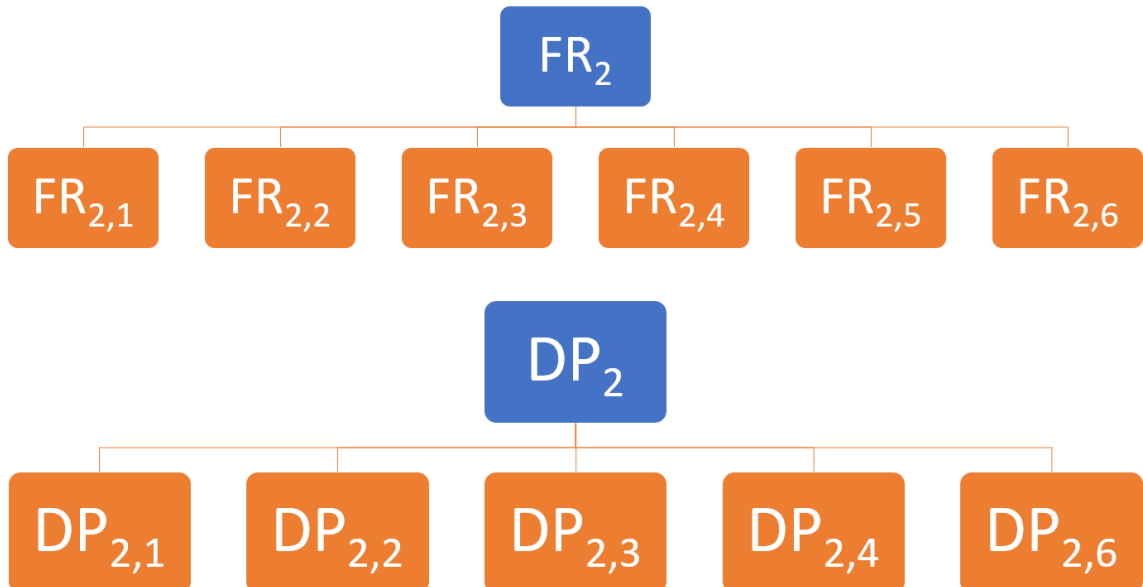
Theorem 16 (Equality of information content)	All information contents that are relevant to the design task are equally important regardless of their physical origin, and no weighting factor should be applied to them.
Theorem 17 (Design in the absence of complete information)	Design can proceed even in 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 decoupled design)	There always exists an uncoupled or a decoupled design that has less information than a coupled design.
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 designs than to satisfy the independence axiom.
Theorem 20 (Design range and coupling)	If the design ranges of uncoupled or decoupled designs are tightened, they may become coupled designs. Conversely, if the design ranges of some coupled designs are relaxed, the designs may become 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;44-48.

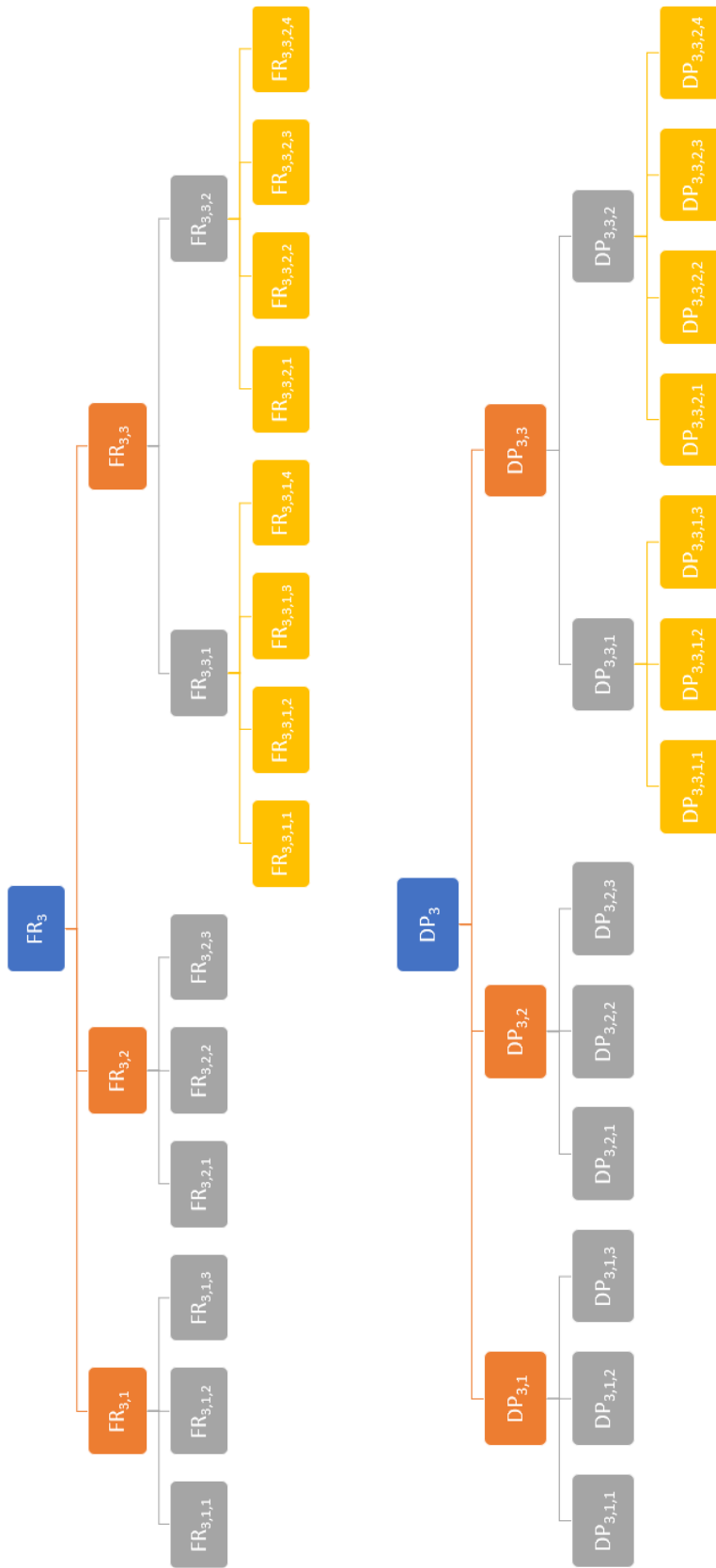
Anexo B1



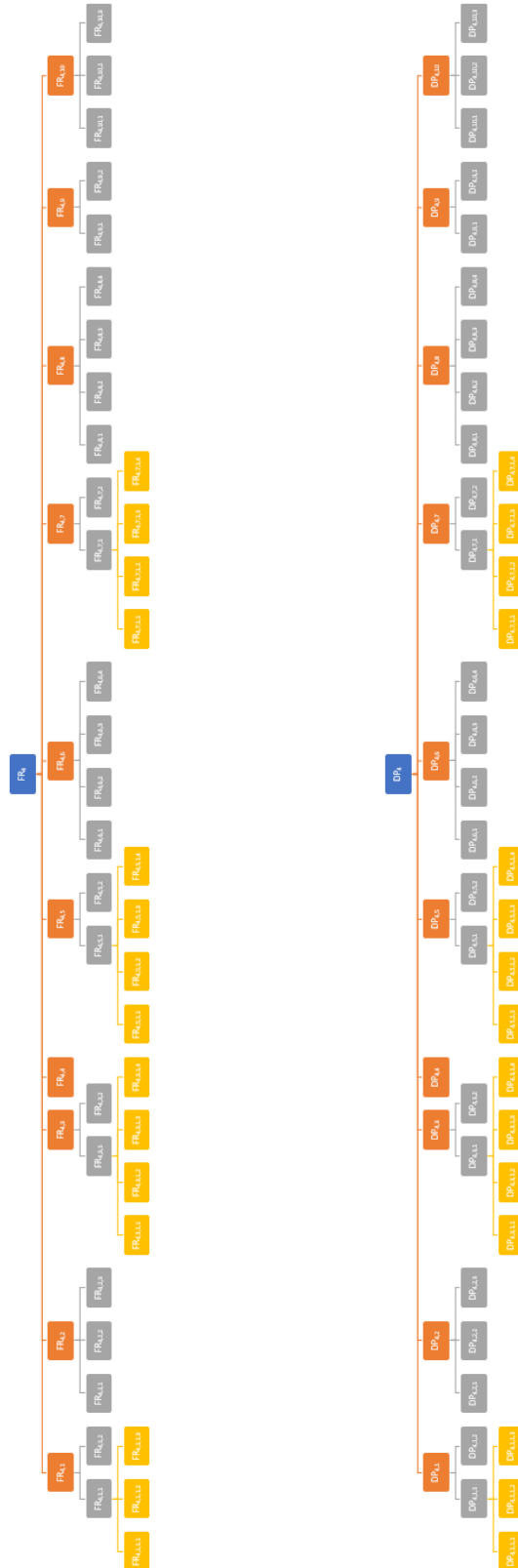
Anexo B2



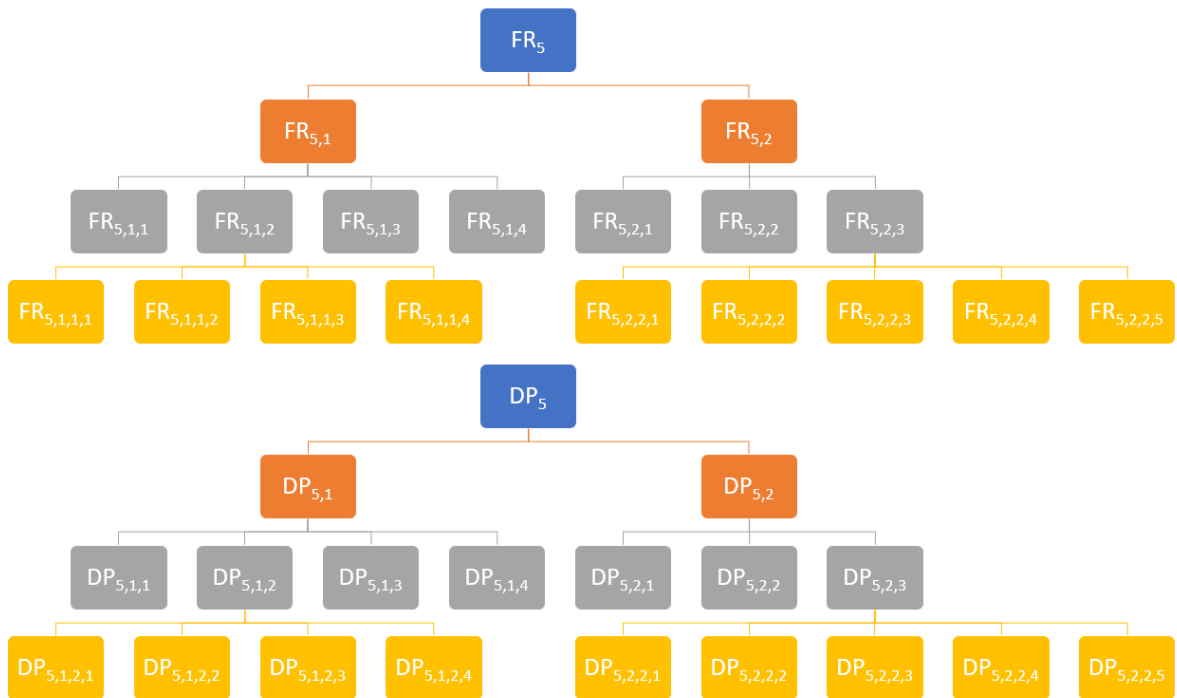
Anexo B3



Anexo B4



Anexo B5



Anexo B6

