Promoção de Eficiência Energética numa Unidade Industrial de Produção de Rações

André dos Santos Veiga Ferreira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Dr. Patrícia de Carvalho Baptista

Dr. André Alves Pina

Júri

Presidente: Prof. Edgar Caetano Fernandes

Orientador: Dr. André Alves Pina

Vogal: Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Dezembro 2017

“What gets measured gets managed”-Peter Drucker

Resumo

Actualmente a melhoria da eficiência energética a nível industrial é fulcral não só pela obrigatoriedade de cumprimento das normas europeias, como também para minimização de custos. Neste contexto, a presente dissertação foca-se na análise comparativa de diferentes estratégias de melhoria da eficiência energética, baseando-se no caso de estudo da Cooperativa Porto Alto – rações para animais, C.R.L.

Deste modo, após uma caracterização rigorosa do consumo de energia desta unidade fabril, pretendeu-se avaliar os impactes energéticos da implementação de cinco cenários de melhoria. Da análise efectuada, conclui-se que a eliminação de anomalias operacionais do quotidiano da fábrica pode gerar incrementos productivos de 2941 toneladas anuais, reduzindo o consumo específico em 2,6%, realçando que a eficiência energética passa não só pela melhoria tecnológica, mas também pela consciencialização e adopção de boas práticas por dos operadores e gestão fabril. Propôs-se ainda a instalação de variadores electrónicos de velocidade nos moinhos de martelos e sobrepressores, que resultaria em reduções no consumo específico de electricidade em 4,3% e 2,3% respectivamente. A implementação de uma unidade de produção de autoconsumo com recurso a painéis fotovoltaicos de 58 kWp permititiria a produção anual de 87,5 MWh dos quais 78% seriam utilizados para autoconsumo e 22% seriam vendidos à rede. Finalmente estudou-se a substituição do sistema de doseamento de milho actual, verificando-se que este se apresenta como um investimento de valor no caso do investimento inicial ser igual ou inferior a 120000€.

Se implementados em conjunto, os cenários de melhoria propostos resultariam num decréscimo anual de 101,4 MWh e 38,7 ton$CO_{2eq,}$ possibilitando em simultâneo um incremento da produção anual em 8077 toneladas. Assim, o consumo específico da unidade industrial pode ser reduzido em 13,9% e o custo específico da ração em 25,1%, o que corresponde a uma poupança anual de 57883 €.

Palavras-Chave: eficiência energética; variadores electrónicos de velocidade; UPAC; sistema fotovoltaico

Abstract

Nowadays energy management is a key factor in order to achieve European Union mandatory targets for environmental sustainability but also with the purpose of cost minimization. The present dissertation is focused on a comparative analysis of different strategies defined with the purpose of improving the efficiency of Cooperativa Porto Alto – rações para animais, C.R.L.

This study aims at modeling the present situation and estimate the impacts of five improving scenarios in the energy performance of the considered plant. After studying several solutions, this analysis concluded that the elimination of certain operational anomalies, which could easily be underestimated, would reduce the plant specific consumption by 2,6% showing that energy performance is strongly related with operators and production management awareness and good habits. Also, the installation of variable speed drives in hammer mills and blowers would result in electricity specific consumption reductions of 4,3% and 2,3% respectively. The annual energy production of a self-consumption photovoltaic system with a peak-power of 58KWp has been estimated at 87,5 MWh of which 78% would be used to self-consumption and the remaining would be sold to the grid. Finally, the replacement of the current corn dosing system has been studied and the maximum initial investment for a valuable project has been quantified as 120000€.

If all the solutions were installed simultaneously, this would result in an annual reduction of 101,4 MWh and avoided emissions of 38,7 tonCO2eq, while there would be a production increase of 8077 ton. Thus, the plant specific consumption could be reduced by 13,9% and the product specific cost could decrease by 25,1%, which corresponds to an annual saving of €57883.

Key Words: energy efficiency; variable speed drives, self-consumption photovoltaic system

Agradecimentos

Uma dissertação de mestrado é fruto, principalmente, de esforço e dedicação individual, contudo, não posso deixar de agradecer o contributo das seguintes pessoas e organizações, sem as quais este trabalho não teria sido possível:

Ao Instituto Superior Técnico, à Cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L e à Galp, pela oportunidade de integrar o Programa Galp 20-20-20, durante o qual este trabalho foi realizado. Em particular aos Drs. Duarte Lopes e José Lopes pelo modo como me receberam na organização, me disponibilizaram todos os meios necessários para a realização deste projecto e foram prescindindo de tempo precioso para acompanhar o meu trabalho periodicamente.

À Engª. Cláudia Vaz por toda a disponibilidade demonstrada no acompanhamento deste estágio, apesar do volume de trabalho infindável que tem a seu cargo e, particularmente, por me ter ajudado a entender todo o processo productivo e me ter disponibilizado toda a informação que necessitei ao longo do processo de investigação.

A todos os funcionários da Cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L, que me integraram no quotidiano laboral e me fizeram sentir parte da equipa.

Aos meus orientadores do Instituto Superior Técnico, Doutora Patrícia Baptista e Doutor André Pina por todo o suporte metodológico e científico que me deram durante a elaboração desta dissertação.

A todos os meus amigos e familiares que contribuíram, mesmo que inequivocamente, para que a realização deste estudo fosse possível, em especial à minha mãe pelo apoio incondicional e ao João Loureiro por me ter disponibilizado um computador sem o qual a fase final deste projecto não teria sido possível.

Índice

Resumo ..... **ii**
Abstract ..... **iii**
1. Introdução **1**
1.1. Enquadramento e Motivação 1
1.2. Objectivos 4
1.3. Estrutura da Dissertação 4
2. Estado da arte **5**
3. Metodologia **16**
3.1. Caracterização da Cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L 16
3.1.1. Descrição do Processo de Fabrico 17
3.1.2. Caracterização Energética e Mássica do Processo 19
3.2. Definição de medidas de melhoria de eficiência energética 36
3.2.1. Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos 36
3.2.2. Instalação de VEV's nos Sobrepressores 40
3.2.3. Substituição do Sistema de Doseamento do Milho 43
3.2.4. Instalação de Unidade de Produção de Autoconsumo de Energia Fotovoltaica 51
3.2.5. Plano para Eliminação dos Imprevistos Operacionais no Doseamento 56
3.3. Parâmetros Financeiros Utilizados na Avaliação de Viabilidade dos Investimentos Propostos 58
4. Resultados e Discussão **60**
4.1. Análise de Impactes da Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos 60
4.2. Análise de Impactes da Instalação de VEV's nos Sobrepressores 62
4.3. Análise de Impactes da Substituição do Sistema de Doseamento do Milho 64
4.4. Análise de Impactes da Instalação de Unidade de Produção para Autoconsumo de Energia Fotovoltaica 67
4.5. Análise de Impactes do Plano para Eliminação dos Imprevistos Operacionais no Doseamento 73
4.6. Comparativo de Cenários e Impactes Conjuntos 74
5. Conclusões e Trabalho Futuro **80**
6. Bibliografia **82**
7. Anexos **84**

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Evolução dos Objectivos 20-20-20 no Panorama Europeu (2) 1
Figura 1.2 – Evolução do Balanço Energético Português (3) 2
Figura 1.3 – Contributo das Fontes de Energia renováveis no Consumo Final Bruto de Energia em Portugal (3) 2
Figura 1.4 – Evolução das Emissões Nacionais de Gases com Efeito de Estufa (3) 3
Figura 1.5 – Evolução da Distribuição do Consumo Energético Global na União Europeia, por Sector de Actividade (5). 3
Figura 2.1 – Impactes do desempenho de diferentes operadores no consumo específico de uma fábrica de produção de rações para animais no Reino Unido (6) 5
Figura 2.2 – Comparação do Consumo Específico para Diversas Tecnologias de Moagem (6) . 6
Figura 2.3 - Distribuição Típica dos Custos Energéticos numa Fábrica de Alimentos Compostos para Animais (6) 7
Figura 2.4 – Variação Típica da Intensidade de Corrente de um Moinho de Martelos Pertencente a uma Fábrica de Rações (6). 8
Figura 2.5 – Variação da Potência Consumida por Moinho de Martelos a Operar em Vazio (10) 8
Figura 2.6 – Análise Granulométrica de Farinados Moídos com Recurso a um Moinho de Martelos, para Martelos com Espessura de 5mm e Folga entre os Martelos e os Crivos de 12mm. 9
Figura 2.7 – Variação da Eficiência e da Capacidade de um Moinho de Martelos com a sua Velocidade de Rotação, para Martelos com Espessura de 5mm e Folga entre os Martelos e os Crivos de 12mm. 9
Figura 2.8 – Curvas Velocidade-Binário características de um Motor de Indução $f1 < f2 < f3 < f4 < f5$ e $f5 = 50\text{Hz}$ (14) 10
Figura 2.9 – Tipos de Curvas Binário-Velocidade (13). 10
Figura 2.10 – Curvas de Variação da Potência Relativa com a Capacidade Utilizada, para Diversos Mecanismos de Controlo de Caudal (13) 11
Figura 2.11 – Custos médios unitários e custos médios por kW de VEV's para diferentes intervalos de potências nominais na Europa 11
Figura 2.12 - Representação Esquemática de um Transportador de Parafuso 12
Figura 2.13 - Representação Esquemática de um Transportador Redler 12
Figura 2.14 – Variação da Eficiência de Transporte com o Ângulo de Inclinação de um Transportador de Parafuso (16) 13
Figura 2.15 – Variação do Coeficiente de Atrito Dinâmico Entre o Milho e a Superfície de Transporte para Superfícies de 3 Metais Destintos (17) 13
Figura 3.1 - Fluxograma produtivo da unidade fabril em estudo 17
Figura 3.2 – Distribuição da Energia Primária e Final Consumida nas Unidade Fabril em Análise 19
Figura 3.3 - Distribuição dos Consumos Mássicos em 2016 20
Figura 3.4 – Distribuição do Produto Final em 2016 21
Figura 3.5 - Fluxograma produtivo simplificado da unidade fabril em estudo 22
Figura 3.6 – Diagrama de Gantt Representativo do Caso Particular do Fabrico da Receita S800 (2 ciclos consecutivos) 25
Figura 3.7 – Diagrama de Gantt dos tempos médios de processamento excluindo os efeitos da fórmula S800 26
Figura 3.8 – Distribuição do Consumo Energético por Zona Fabril 28
Figura 3.9 – Distribuição do Consumo Energético por Processo 28
Figura 3.10 – Distribuição do Consumo Energético por Tipologia de Equipamento 29
Figura 3.11 – Perfil de Carga Diário da Fábrica 34
Figura 3.12 – Distribuição de Consumo por Tipologia de Equipamento Com Base na Potência Activa Considerando as Fracções de Tempo de Funcionamento em Carga Médias entre Março e Junho de 2016 35
Figura 3.13 – Curva de Stribeck (24) 37

Figura 3.14 – Curva de Carga Típica de Moinhos de Martelos e Ponto de Funcionamento Actual (Adaptado de (10)) 38
Figura 3.15 – Pontos de Funcionamento em Vazio dos Moinhos de Martelos Após Instalação de VEV's para N=1000 rpm e N=1500 rpm. 39
Figura 3.16 - Pontos de Funcionamento e Perfis de Carga dos Sobrepressores, nos Diferentes Regimes, Com e Sem VEV's. 41
Figura 3.17 - Sistema de Doseamento de Milho Actual 44
Figura 3.18 – Representação Esquemática das Disposições de Doseamento do Milho "1BPar" e "1BRed" 49
Figura 3.19 - Representação Esquemática da Disposição de Doseamento "2BRaz" (Imagem Fornecida pela Empresa "metalo-nicho SA."). 50
Figura 3.20 – Representação Esquemática do Ângulo de Declinação Solar Fonte? 51
Figura 3.21 – Representação Esquemática dos Ângulos de Altitude e Azimute Solar Fonte? .. 51
Figura 3.22 – Variação Horária do Ângulo de Altitude Solar ao Longo do Ano Calculada Para a Localização em Estudo. 52
Figura 3.23 – Representação Esquemática da Distância Entre Fileiras Consecutivas (30) 53
Figura 4.1 – Evolução do Retorno do Investimento Acumulado ao longo dos 5 primeiros anos 62
Figura 4.2 – Evolução do Retorno do Investimento Anual Acumulado Característico do Cenário 2 63
Figura 4.3 - Variação da Irradiação Incidente Anual com o ângulo de Inclinação dos Painéis Solares 68
Figura 4.4 – Comparação entre o Perfil de Consumo Energético Típico de um dia Útil e o Perfil de Produção de Cada uma das Potências de Instalação em Estudo (Junho). 70
Figura 4.5 – Comparação entre o Perfil de Consumo Energético Típico de um dia Não-Útil e o Perfil de Produção de Cada uma das Potências de Instalação em Estudo (Junho). 70
Figura 4.6 – Sistematização da metodologia utilizada na avaliação conjunta dos cenários A a D 76
Figura 4.7 – Impacte Global dos Cenários Propostos no Consumo Específico 77
Figura 4.8 - Impacte Global dos Cenários Propostos no Custo Específico 77
Figura 4.9 - Evolução do PRI com o Aumento da Cadência de Produção (VEV's Moinhos de Martelos). Os pontos apresentados estão identificados através da nomenclatura (xx,yy), em que "xx" corresponde à cadência de produção e "yy" se refere ao PRI. 78
Figura 4.10 - Evolução do PRI com o Aumento da Cadência de Produção (VEV's Blowers). Os pontos apresentados estão identificados através da nomenclatura (xx,yy), em que "xx" corresponde à cadência de produção e "yy" se refere ao PRI. 78

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Distribuição do consumo anual de energia primária e final em 2016 por vector energético 19
Tabela 3.2 – Distribuição Absoluta e Relativa dos Consumos Mássicos em 2016 20
Tabela 3.3 – Lista de Precedências entre Processos de Dois Ciclos Consecutivos 22
Tabela 3.4 – Estudo dos tempos característicos de cada processo 25
Tabela 3.5 – Estudo dos tempos característicos de cada processo sem inclusão da fórmula S800 26
Tabela 3.6 – Fracções de Tempo de Funcionamento em Carga Médias por Tipologia de Equipamento 27
Tabela 3.7 – Fracções de Tempo em Carga Utilizados na Análise de Sensibilidade 31
Tabela 3.8 – Análise de Sensibilidade ao Modelo de Distribuição Energética para a Semana de 20-24 de Fevereiro de 2016 31
Tabela 3.9 - Consumos Específicos por Processo 32
Tabela 3.10 - Consumos Específicos por Tipologia de Equipamento 33
Tabela 3.11 – Evolução da Cadência de Produção Média no Primeiro Semestre de 2017 34
Tabela 3.12 – Fracções de Tempo em Carga por Tipologia de Equipamento Obtidas Para a Conjectura Actual 35
Tabela 3.13 – Índices de Desempenho Energético Actuais 35
Tabela 3.14 - Definição dos Cenários a Analisar 36
Tabela 3.15 – Tempos de Doseamento do Milho 43
Tabela 3.16 - Fracções de tempo em carga por tipologia de equipamento obtidas para a redução do tempo de ciclo em 21 segundos. 47
Tabela 3.17 – Sistematização das 3 Soluções Estudadas para a Substituição do Sistema de Doseamento Actual 49
Tabela 3.18 – Irradiação Solar Mensal Calculada com Recurso ao Software Meteonorm 7.2.1 Para a Localização em Estudo 54
Tabela 3.19 - Distribuição do Consumo Típico da Instalação Por Tarifa Energética 56
Tabela 3.20 - Fracções de Tempo em Carga Resultantes do Plano de Eliminação de Imprevistos Operacionais no Doseamento 57
Tabela 4.1 - Impactes da Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos para N_{vazio}=1500 rpm 60
Tabela 4.2 - Impactes da Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos para N_{vazio} entre 1000 rpm e 1500 rpm 61
Tabela 4.3 – Impactes da Instalação de VEV's nos Sobrepressores 63
Tabela 4.4 – Resultados do Dimensionamento dos Transportadores *Redler* Presentes nas Disposições Propostas para o Novo Sistema de Doseamento de Milho 66
Tabela 4.5 - Variação no Consumo Específico Causada Pelas Disposições Estudadas Para o Doseamento do Milho 66
Tabela 4.6 – Ganhos Líquidos Anuais Obtidos com Cada Disposição Proposta Para o Doseamento do Milho 67
Tabela 4.7 - Valores Máximos Para Investimento de Valor em Cada Disposição de Doseamento do Milho 67
Tabela 4.8 – Energia Eléctrica Anual Produzida por Cada uma das Potências de Instalação em Análise e Correspondente Energia Útil 69
Tabela 4.9 Fracções Energéticas Anuais Utilizadas para Autoconsumo e Excedente Vendido à RESP Mediante a Potência de Instalação. 70

Tabela 4.10 – Ganhos Económicos Totais Provenientes de Cada Potência de Instalação em Estudo 71
Tabela 4.11 – Análise de Fluxos de Caixa Decorrentes da Implementação do cenário D..... 72
Tabela 4.12 – Índices de Desempenho Financeiro da UPAC fotovoltaica 73
Tabela 4.13 – Principais Indicadores de Desempenho de Cada Cenário de Melhoria 74
Tabela 4.14 - Fracções de Tempo em Carga Resultantes da Aplicação Conjunta dos Cenários Propostos 75
Tabela 4.15 - Índices de Desempenho Energético Específico Resultantes da Aplicação Conjunta dos Cenários Propostos..... 76
Tabela 4.16 - Parâmetros Financeiros Resultantes da Aplicação Conjunta dos Cenários Propostos 77
v) Factores de Atrito para Diferentes Tipos de Rolamentos (16)..... 100

Lista de Acrónimos

WCED - Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

GEE - Gases com Efeito de Estufa

FER - Fontes de Energia Renovável

PNAEE - Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

PNAER 2020 - Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis até 2020

SGCIE - Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia

PREn - Planos de Racionalização do Consumo de Energia -

VEV's - Variadores Electrónicos de Velocidade

UPAC – Unidade de Produção de Autoconsumo

RESP - Rede Eléctrica de Serviço Público

OMIE - Operador do Mercado Ibérico de Energia

SEM - Sistema Eléctrico Nacional

CIEG - Custos de Interesse Económico Geral

MP – Matéria-Prima

PF – Produto Final

UPAC - Unidade de Produção para Autoconsumo

PEIOD - Plano de Eliminação de Imprevistos Operacionais no Doseamento

USCS (United States Customary System)

MPPT - Maximum Power Point Tracker

LULUCF - Land Use, Land Use Change and Forestry

Nomenclatura

V_{me} - Velocidade de um motor eléctrico

F - Frequência de alimentação

P - Número de pares de pólos de um motor eléctrico

$R_{UPAC,m}$ - Remuneração da electricidade fornecida à RESP no mês "m"

$E_{fornecida,m}$ - Energia fornecida à rede no mês "m"

$OMIE_m$ - Valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do OMIE para Portugal (mercado diário), relativo ao mês "m"

P - Potência instantânea

I - Intensidade de corrente

V - Diferença de potencial

STC - Standard Test Conditions

N - Número mínimo de cronometragens para a confiança e precisão pretendidas

Z - Número de desvios padrão que define a amplitude do intervalo de confiança para o nível de confiança pretendido

σ - Desvio padrão

p - Erro relativo

$\bar{x}$ - Valor médio.

E_{ic} – Energia consumida pelo equipamento "i" em regime de carga

E_{iv} – Energia consumida pelo equipamento "i" em regime de vazio

f_{kc} – Fracção de tempo de funcionamento em carga média da tipologia de equipamentos "k"

f_{kv} – Fracção de tempo de funcionamento em vazio média da tipologia de equipamentos "k"

P_{nom} - Potência nominal

P_m - Potência mecânica

$\Delta P_{MMvazio}$ - Diferencial na potência mecânica utilizada pelos dos moinhos de martelos, após a instalação de VEV's.

$P_{MMvazio}$ - Potência mecânica utilizada actualmente pelos moinhos de martelos em vazio

$\Delta E_{MMtotal}$ - Redução no consumo energético total dos moinhos de martelos

η_{VEV} - Rendimento dos VEV's

ΔE_{total} – Variação do consumo energético total da instalação indústrial

E_{MM} – Energia semanal consumida pelos moinhos de martelos

E_{total} - Energia semanal total consumida na unidade fabril

P_{SPi} - Potência mecânica utilizada pelos sobrepressores nas condições actuais (i=carga, vazio)

P_{SPVEVi} - Potência mecânica utilizada pelos sobrepressores após instalação de VEV's (i=carga, vazio)

$P_{SPvazio}$ – Potência mecânica utilizada pelos sobrepressores em vazio

$\Delta P_{SPcarga}$ - Variação da potência mecânica utilizada pelos sobrepressores em carga

$\Delta E_{SPcarga}$ – Variação do consumo energético dos sobrepressores em carga

$\Delta E_{SPvazio}$ – Variação do consumo energético dos sobrepressores em vazio

$E_{SPtotal}$ - Redução total do consumo de energia dos sobrepressores,

E_{SP} – Energia semanal consumida pelos sobrepressores

$Q_{objectivo}$ - Caudal volúmico Objectivo

m_{max} - Massa máxima de milho utilizada nas fórmulas em produção

$t_{objectivo}$ - Tempo objectivo definido para o processo de doseamento de milho

ρ_{milho} - Massa específica do milho

$Q_{projecto}$ - Caudal volúmico de projecto

CF – Factor de Capacidade

S – Velocidade de rotação

Q_{1rpm} – Caudal volúmico transportado por um transportador de parafuso para S=1rpm

FHP - Potência necessária para vencer as forças de atrito nos mecanismos de transmissão

MHP - Potência exigida para ultrapassar as forças de atrito entre o material e a superfície de um transportador

DF - Factor de diâmetro

HBF - Factor associado ao tipo de rolamentos a utilizar

L-Comprimento

CP-Caudal mássico

MF - Coeficiente de atrito dinâmico entre o material a transportar e a superfície do transportador

e_T - Eficiência do sistema de transmissão

FI - Factor de inclinação

TSHP – Potência total necessária para mover material com recurso a um transportador de parafuso.

P_e – Potência Eléctrica

Pevazio - Potência eléctrica consumida em regime de vazio

η_e - Rendimento de um motor eléctrico

n_{upset} – Coeficiente de segurança utilizado no dimensionamento de transportadores

m_{MT} - Massa de material a transportar

μ_{MT} - Coeficiente de atrito cinético entre o material e o transportador

m_{CP} - Massa da corrente do transportador incluindo os arrastadores acoplados

μ_{CP} - Coeficiente de atrito cinético entre a corrente e a polia

g - Aceleração gravítica

v - Velocidade nominal do transportador

η_m - Rendimento mecânico

$A_{útil}$ - Área útil de transporte

$V_{útil}$ - Volume útil de transporte

ΔProd – Variação do volume de produção

Δc_e – variação do consumo específico

ΔE_{total} – Variação da Energia total consumida na unidade fabril

ΔC_e - Variação do custo específico

$Prod_{prevista}$-Volume productivo previsto

$Prod_{actual}$- Volume productivo actual

$C_{eactual}$ - Custo específico actual

ml – Margem de lucro sobre 1 tonelada de produto final

G – Irradiância

H – Irradiação

δ - Ângulo de declinação solar

α - Ângulo de altitude solar

a_s - Ângulo de azimute solar

H - Ângulo horário

AM - Factor de massa de ar

Θ - Inclinação dos painéis fotovoltaicos

d - Afastamento entre fileiras

d_1 - Distância vertical, medida em planta, entre fileiras consecutivas

γ - Inclinação da superfície

b -Altura dos painéis fotovoltaicos
f_{GT} - Factor de perdas relativas às condições de irradiação e temperatura locais
$\eta_{modulos}$ - Rendimento de conversão energética dos módulos fotovoltaicos
$\eta_{modulosSTC}$ - Rendimento de conversão energética dos módulos fotovoltaicos em condições STC
H_{AM} - Irradiação média anual, corrigida pelo factor de massa de ar
E_{in} - Energia anual resultante da conversão de energia solar em electricidade
E_{out} - Electricidade anual, produzida pela UPAC, fornecida à rede
f_i – Perdas associadas à conversão de energia solar (i=qualidade, compatibilidade, ohmicas)
$\eta_{inversores}$ – Rendimento dos inversores de corrente
PRI - Período de retorno do investimento
VAL – Valor actual líquido
k - Taxa de actualização ajustada ao risco
p_t - Variação anual da taxa de inflação no período t
F_t - Fluxo de caixa no período t
A_0 - investimento inicial
e_t – Variação do custo da electricidade no período t
IR - Índice de rentabilidade
TIR - Taxa interna de retorno
LCOE - Custo nivelado da energia
M_t - Custos de manutenção no período t

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

O desenvolvimento económico observado nas últimas décadas caracterizou-se por um aumento exponencial do consumo de energia produzida com recurso a combustíveis fósseis. A percepção do impacte ambiental associado à produção e consumo deste tipo de recursos, assim como do seu carácter finito, levou à adopção formal por parte da ONU do conceito de *desenvolvimento sustentável,* em 1972, que se materializou na criação da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED). No mesmo ano, foi organizado o primeiro de vários encontros globais consignados ao tema, a conferência de Estocolmo, onde ficaram definidos os 26 princípios fundamentais a adoptar à escala mundial, no sentido de garantir a preservação ambiental. Realizaram-se mais duas conferências até 1995 e desde então, estes eventos passaram a ter periodicidade anual, com o objectivo de garantir a cooperação entre todas as nações tendo em vista a definição e cumprimento de metas ambientais mensuráveis, eficientes e alcançáveis. Destes congressos anuais resultaram inúmeros documentos relevantes, dos quais se destacam, o Protocolo de Quioto, a Agenda 21, os acordos de Copenhaga, Cancun e Durban e ainda, mais recentemente, o acordo de Paris (1).

Mediante estas políticas de desenvolvimento sustentável, o conselho Europeu adoptou em 2008 metas mais ambiciosas do que as estabelecidas no Protocolo de Quioto, através da criação de conjunto de metas designadas por Objectivos 20-20-20. Este plano estabeleceu o objectivo de atingir, até 2020, as seguintes metas: redução de 20% nas emissões de GEE (Gases com Efeito de Estufa) face ao valor registado em 1990; melhoria de 20% na eficiência energética, face ao valor projectado em 2007; 20% de taxa de integração de Fontes de Energia Renovável (FER); e 10% de taxa de utilização de biocombustíveis no sector dos transportes (2). A evolução recente do panorama energético europeu, tem vindo a demonstrar que, mantendo-se a trajectória actual, os objectivos tendem a ser cumpridos na sua totalidade, sendo que, em 2007, o objectivo referente às emissões de GEE já tinha sido atingido (2), como se pode observar na Figura 1.1. A situação portuguesa, em particular, também se afigura optimista, uma vez que foram adoptadas diversas medidas no sentido de cumprir os objectivos 20-20-20 e no caso das metas que já foram alcançadas, têm sido estabelecidos planos de acção cuja finalidade é atingir níveis de melhoria que excedem as directivas europeias.

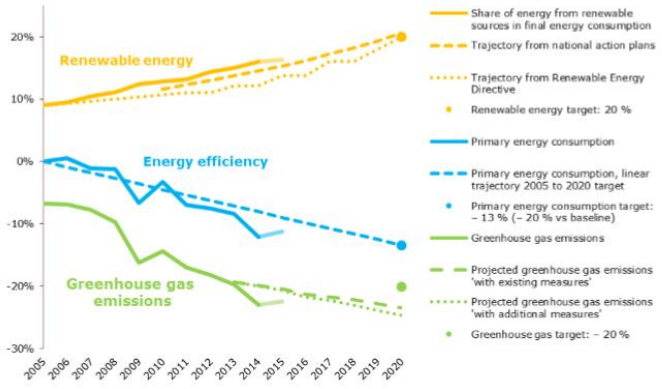


Figura 1.1 – Evolução dos Objectivos 20-20-20 no Panorama Europeu (2)

No que concerne ao aumento da eficiência energética, o PNAEE (Plano Nacional de Acção para a Eficiência Enegética) fixou, em 2016, um objectivo mais ambicioso de reduzir o consumo global de energia primária em 25% e o consumo particular da administração pública em 30% relativamente aos valores médios registados no período entre 2001 e 2005. Na Figura 1.2 apresenta-se o balanço energético português entre 2005 e 2015.

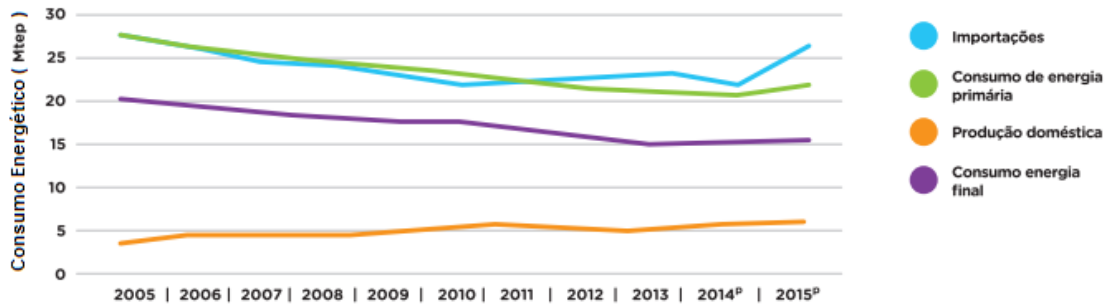


Figura 1.2 – Evolução do Balanço Energético Português (3)

Em relação à meta estabelecida para a taxa de integração de FER, a situação portuguesa é bastante peculiar, já que, como é possível observar na Figura 1.3, Portugal possuía à partida um valor superior à referência proposta. Deste modo, foram adoptados novos objectivos no PNAER 2020 (Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis para o período 2013-2020), nomeadamente, 31% para a utilização de energias renováveis no consumo final bruto de energia, 10% para o consumo energético nos transportes e ainda 59,6% de fontes renováveis na electricidade.

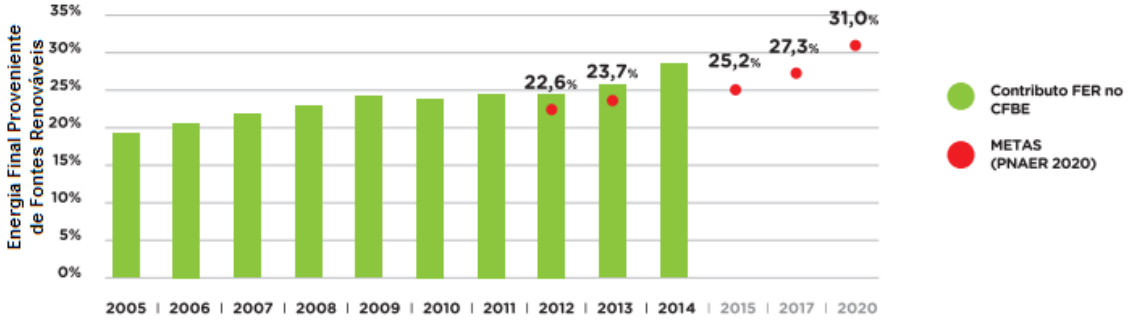


Figura 1.3 – Contributo das Fontes de Energia renováveis no Consumo Final Bruto de Energia em Portugal (3)

A evolução das emissões de GEE em Portugal desde 1990 reflecte a evolução da economia nacional. Na década de 1990, o aumento das emissões esteve associado ao acréscimo da procura de energia e mobilidade decorrente da expansão económica. Por outro lado, a situação de estagnação e recessão verificada nos últimos anos traduziu-se num decréscimo das emissões. Contudo, é importante salientar que a tendência de estabilização/redução das emissões teve início antes da crise financeira, fruto do avanço tecnológico existente nos sistemas de controlo de poluição, introdução de combustíveis menos poluentes, instalação de unidades de ciclo combinado, implementação de unidades de cogeração e de uma melhoria da eficiência energética e tecnológica dos processos industriais. Os valores registados até 2015 (Figura 1.4) confirmam que, apesar do aumento inicial, se verifica uma trajectória de cumprimento das metas europeias, tendo já ocorrido uma redução de 27% face aos níveis de 2005 (3).

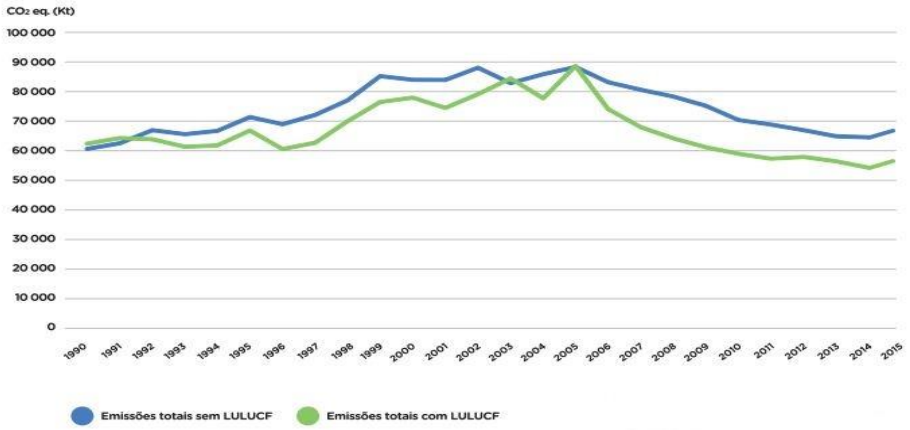


Figura 1.4 – Evolução das Emissões Nacionais de Gases com Efeito de Estufa (3)

Historicamente, o sector industrial sempre foi o maior consumidor energético a nível global e mesmo após a redução significativa que se tem verificado desde a década de 1980, fruto de melhorias tecnológicas e novas políticas de gestão energética, este sector continua a ser, a par do sector dos transportes, um dos maiores consumidores de energia. Na Figura 1.5, verifica-se que na União Europeia, em particular, este é o segundo sector de actividade com maior quota de consumo energético, logo a seguir aos transportes, tendo representado 25,3% do consumo total de 2010 (4), (5).

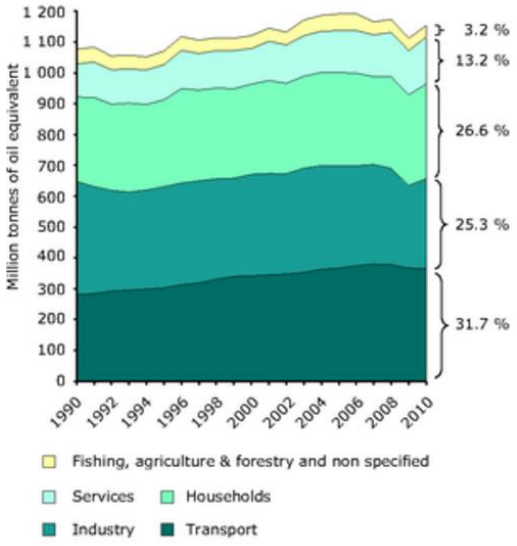


Figura 1.5 – Evolução da Distribuição do Consumo Energético Global na União Europeia, por Sector de Actividade (5).

Apesar do decréscimo recente, existe ainda um enorme potencial de economia energética associado ao aumento da eficiência na utilização de energia primária por parte das indústrias. Tendo este facto em consideração, em 2008 foi aprovado em Portugal o Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE). A legislação implementada prevê a obrigatoriedade de realização de auditorias energéticas que avaliem todos os aspectos relativos à promoção do aumento global da eficiência energética, podendo também incluir aspectos relativos à substituição por fontes de energia com origem renovável. Esta obrigatoriedade é válida para entidades cujo consumo energético anual exceda os 500 teps, sendo que tais eventos deverão ser realizados a cada 6 anos no caso de organizações com consumos iguais ou superiores a 1000 tep/ano e a cada 8 anos para entidades cujos consumos de energia se situem entre 500 teps/ano e 1000 tep/ano. Após estas auditorias, deverão ser elaborados planos de racionalização do consumo de energia (PREn) que prevêm a implementação de todas as sugestões de melhoria identificadas na auditoria energética com períodos de retorno sobre o

investimento igual ou inferior a 5 anos, no caso das entidades que consomem mais de 1000 tep/ano e 3 anos no caso das restantes organizações. Está ainda definido que deverá existir um decréscimo de, no mínimo 6% da intensidade energética, 6 anos após a auditoria energética nas organizações com consumos superiores a 1000 tep e 4% em 8 anos nas remanescentes.

1.2. Objectivos

No contexto actual em que se existe ainda um potencial de melhoria de eficência energética no sector industrial, em particular no sector de produção de rações, o objectivo deste estudo passa pela identificação de oportunidades de melhoria de eficiência energética na instalação fabril da cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L, tendo em vista a diminuição do consumo específico, a redução de emissões de GEE, a integração de energias renováveis e a redução dos custos energéticos.

Desta forma, através da avaliação de cenários alternativos, pretende-se avaliar os impactes em termos de energia poupada e emissões evitadas em termos absolutos e específicos (por unidade de massa de ração produzida), assim como efectuar uma análise técnico-económica para cada uma das soluções apresentadas e para o conjunto dos cenários propostos como um todo.

1.3. Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 faz-se uma contextualização geral, apresentando-se o paradigma energético europeu e português, em particular. Aborda-se o conceito de desenvolvimento sustentável assim os protocolos que foram sido estabelecidos ao longo dos anos no sentido de definir metas concretas que fossem de encontro à definição do mesmo.

No capítulo 2 elabora-se uma análise do estado da arte no que concerne à optimização energética no sector industrial, particularizando-se para o caso da indústria de produção de alimentos compostos para animais.

O capítulo 3 consiste, numa fase inicial, na apresentação do caso de estudo, contemplando a descrição do processo de fabrico e a caracterização energética e mássica do mesmo. Posteriormente, são definidos os cenários de melhoria analisados, assim como a metodologia utilizada na avaliação de impactes energéticos, ambientais e financeiros dos mesmos.

No capítulo 4 quantificam-se os impactes energéticos e ambientais de cada uma das soluções de melhoria propostas procedendo-se, em seguida, à avaliação de viabilidade financeira das mesmas. Numa fase seguinte, os cenários propostos são comparados entre si definindo-se uma hierarquia por prioridades de investimento baseada nos indicadores financeiros explicitados no capítulo 2. Finalmente, efectua-se uma análise da viabilidade do investimento global, considerando a implementação simultâneas do conjunto das propostas de melhoria apresentadas

Por fim, no capítulo 5, apresenta-se uma visão global das principais conclusões obtidas neste projecto de investigação, assim como um conjunto de sugestões de trabalho futuro para que este estudo possa ser retomado numa perspectiva de melhoria contínua, possibilitando o cálculo da distribuição de consumo energético de forma mais precisa à medida que estão a ser instaladas tecnologias de monitorização e contemplando ainda a hipótese de possível aumento da cadência productiva, fruto da implementação de tecnologias mais eficientes na linha de produção.

2. Estado da arte

Neste capítulo abordar-se-ão os principais conceitos e estudos que serviram de base teórica a esta dissertação, nomeadamente no que concerne aos efeitos da alteração de parâmetros operacionais e de projecto no desempenho e eficiência energética dos equipamentos analisados, tendo em vista a promoção de eficiência energética numa unidade industrial de produção de alimentos compostos para animais, objecto de estudo neste trabalho conforme definido na Secção 1.2.

Segundo uma investigação conduzida pela organização “Carbon Trust” em 2010 (6), os custos de energia representam uma pequena parcela do custo final dos alimentos compostos para animais, sendo que a vasta maioria dos gastos está associada à aquisição das matérias-primas. Contudo, trata-se de uma parcela relevante dos custos operacionais (cerca de 30%) e a optimização do seu consumo tem vindo a tornar-se um factor prioritário para o sector. Tal priorização está relacionada com o modelo de negócio maioritariamente adoptado no sector da produção pecuária, já que, regra geral, as explorações pecuárias de grande dimensão possuem a própria unidade de produção de rações. Desta forma, as poupanças energéticas, para além de possibilitarem uma vantagem competitiva ao nível do preço de venda do produto final, permitem ainda a realocação dos recursos económicos na aquisição de matérias-primas de maior qualidade, o que influencia directamente a qualidade da carne, traduzindo-se num factor diferenciador (7).

No entanto, actualmente, existe ainda um reduzido número de profissionais dedicados à gestão energética de fábricas de rações e, apesar da tecnologia instalada produzir elevadas quantidades de informação, para efeitos de controlo e automação, geralmente, estes dados não se encontram disponíveis para consulta, de modo a servirem de base à tomada de decisão dos agentes responsáveis pelo correcto funcionamento das unidades industriais. Assim, é frequente que os gestores tenham consciência de que existe margem de melhoria, embora careçam de informação sólida que lhes permita fundamentar um plano de acção/investimento adequado (6). É ainda importante salientar que apesar da tendência para a automação dos processos, os índices de desempenho energético neste sector estão ainda dependentes da perícia do operador da sala de comando. Um estudo conduzido no Reino Unido, pela organização Carbon Trust, em 2010, cujos resultados são apresentados na Figura 2.1, concluíu que o consumo energético específico de uma dada unidade industrial variava até 40% consoante o operador presente em cada turno. Esta variação está relacionada com a experiência e tem tendência para se reduzir à medida que se desenvolvem ferramentas de planeamento e optimização da produção, reduzindo o impacte do factor humano na eficiência do processo.

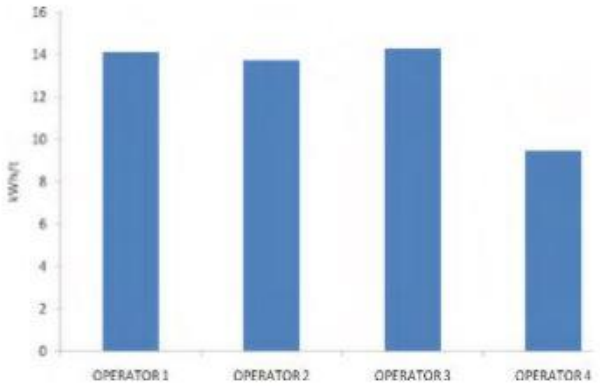


Figura 2.1 – Impactes do desempenho de diferentes operadores no consumo específico de uma fábrica de produção de rações para animais no Reino Unido (6).

De acordo com um estudo levado a cabo por J. Gembicki em 2016 (7), existem diversas medidas tecnológicas e operacionais cuja aplicação é transversal à vasta maioria das unidades

industriais de produção de rações, no sentido de optimizar o seu consumo energético, entre as quais se destacam:

- A instalação de um sistema de controlo activo de energia e optimização dos equipamentos e respectivos parâmetros de funcionamento, com base nos dados obtidos;
- A calendarização da produção de modo a produzir lotes maiores do mesmo tipo de ração, diminuindo assim os tempos de *setup* e consequente consumo dos equipamentos em vazio;
- A substituição dos moinhos de martelos por *multicrackers*, cujo consumo específico é significativamente inferior (cerca de 80%), como se constata na Figura 2.2**.**

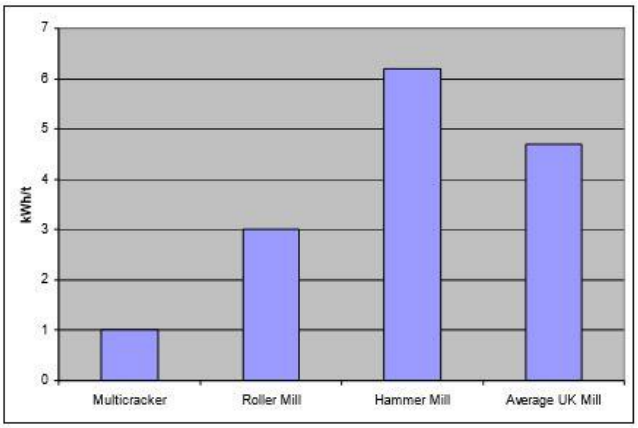


Figura 2.2 – Comparação do Consumo Específico para Diversas Tecnologias de Moagem (6)

A partir do momento em que seja instalado um sistema de monitorização energética, a análise dos dados obtidos pode ser feita utilizando duas abordagens destintas (7).

- O método *"top-down"* em que o estudo se inicia por uma visão geral do sistema, aprofundando-se o conhecimento do mesmo à medida que se atingem níveis mais baixos, até que se entra no detalhe das especificações dos elementos básicos.
- A abordagem "*bottom up*", na qual se começa por analisar detalhadamente cada elemento dos subsistemas básicos, aglomerando-se progressivamente os mesmos até se obter uma visão geral do sistema como um todo.

Como podemos verificar na Figura 2.3, numa instalação industrial típica de produção de alimentos compostos para animais, os equipamentos responsáveis pela maioria dos custos energéticos são as granuladoras, os condicionadores e os moinhos de martelos (6). No caso específico das fábricas especializadas na produção de **produtos farinados**, os dois primeiros equipamentos mencionados não existem ou não assumem tal relevância, pelo que maior fracção de consumo se deve aos **moinhos de martelos**.

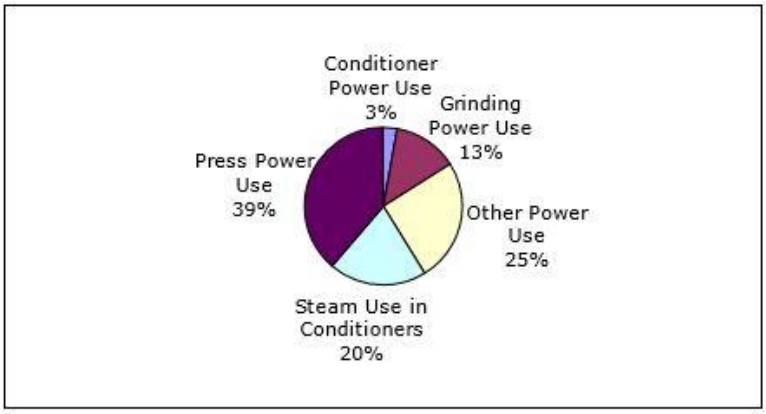


Figura 2.3 - Distribuição Típica dos Custos Energéticos numa Fábrica de Alimentos Compostos para Animais (6)

Dado o peso relativo dos moinhos de martelos no consumo energético deste tipo de instalações industriais, o estudo do seu funcionamento, tanto **em carga** como **em vazio**, é crucial para que se possam definir sugestões de melhoria da eficiência desta instalação. Os principais factores que afectam a eficiência dos moinhos de martelos são os seguintes: propriedades físicas da matéria-prima, velocidade de rotação dos martelos, distância entre os martelos e os crivos, dimensão do crivo e diâmetro dos seus orifícios, volume da câmara de moenda, tipo de alimentação (contínua ou descontínua), método de drenagem das matérias-primas moídas (sobrepressão ou subpressão), estado de desgaste dos martelos e dimensões dos martelos (8), (9).

Outro dos desperdícios energéticos mais frequentes neste tipo de instalação são os elevados tempos de funcionamento em vazio, que decorrem entre o processamento de ciclos ou lotes[1] consecutivos e não se traduzem em valor acrescentado para o produto final. Durante estes períodos, o consumo é reduzido face ao regime de funcionamento em carga; no entanto, caso sejam períodos demasiado longos, adquirem um peso significativo na factura energética. Na Figura 2.4 apresenta-se o perfil de consumo típico de um moinho de martelos (6) onde se evidenciam, a vermelho, períodos de funcionamento em vazio.

[1] O fabrico de alimentos compostos para animais está, frequentemente, organizado em ciclos de massa constante, de modo a facilitar os processos de automação e rastreabilidade. Assim, o valor da massa de um lote será um múltiplo da massa pré-definida para cada ciclo.

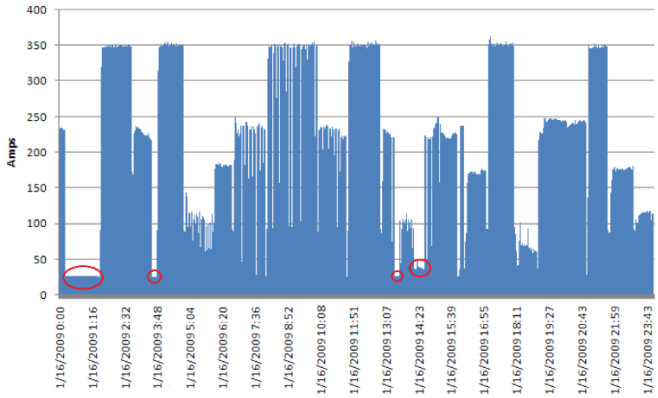


Figura 2.4 – Variação Típica da Intensidade de Corrente de um Moinho de Martelos Pertencente a uma Fábrica de Rações (6).

Com o objetivo de analisar a variação da energia específica consumida e a distribuição da dimensão das partículas obtidas para diferentes velocidades de rotação, Bitra et al (2009) realizaram um estudo no qual foi necessário, numa fase inicial, medir a potência, para diferentes velocidades em regime estacionário, em vazio, do moinho de martelos utilizado (18 kW com um rotor de 230 mm). Para esse efeito, colocaram um sensor de velocidade e de binário (Series 4200 PCB Piezotronics, Depew, NY - 0,05% de precisão) no veio de transmissão do motor. Os dados relativos a estas duas grandezas foram recolhidos em períodos de 60 segundos com recurso a um módulo de processamento analógico-digital (National Instruments, Austin, TX). Os resultados deste estudo revelaram que, na gama de velocidades de funcionamento do moinho analisado (1500 rpm – 3500 rpm), a potência consumida, em vazio, é caracterizada por uma equação de segunda ordem, apresentada na Figura 2.5. Esta variação quadrática foi atribuída, pelos autores, ao aumento da velocidade e do binário, em simultâneo, sendo que o aumento do binário foi significativamente inferior ao da velocidade, tendo variado entre os 10,89 N.m e os 13,86 N.m enquanto a velocidade variou entre as 1500 rpm e as 3500 rpm (10).

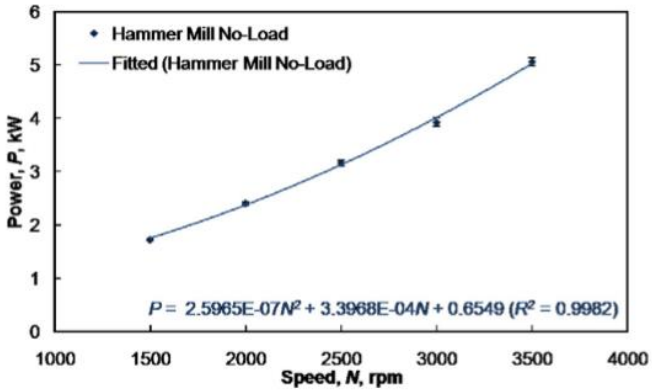


Figura 2.5 – Variação da Potência Consumida por Moinho de Martelos a Operar em Vazio (10)

Posteriormente, El Shal, et al (2010) levaram a cabo um estudo em que se analisou o impacte da variação de diversos parâmetros operacionais tais como a velocidade de rotação, a espessura dos martelos, a folga entre os martelos e os crivos e a percentagem de humidade no material a processar, no desempenho de moinhos de martelos. Esta avaliação foi realizada com recurso a indicadores como a capacidade (massa processada por unidade de tempo), a eficiência (definida como o quociente entre o tempo de processamento e o tempo total de funcionamento), os custos operacionais e a distribuição de dimensão das partículas obtidas. O moinho em estudo apresentava um rotor com diâmetro de 145 mm e a gama de velocidades utilizada variou entre as 1550 e as 2250 rpm. Como se verifica na Figura 2.6, os autores concluíram que a velocidade mais reduzida – 1550 rpm – é a mais indicada para a produção de rações sob a forma de farinha, na medida em que origina a menor percentagem de finos (partículas de diâmetro inferior a 3

mm). No entanto, este estudo revelou ainda que a capacidade de produção dos moinhos varia proporcionalmente à sua velocidade, como se verifica na Figura 2.7(11).

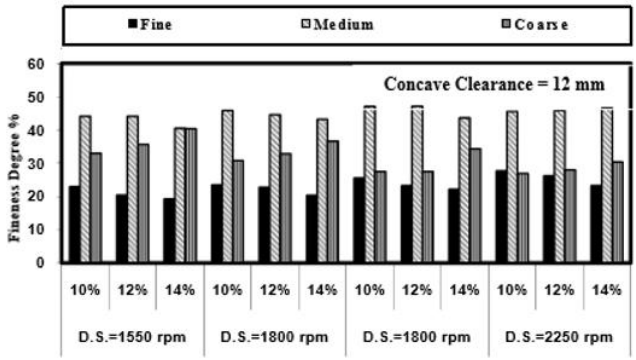


Figura 2.6 – Análise Granulométrica de Farinados Moídos com Recurso a um Moinho de Martelos, para Martelos com Espessura de 5mm e Folga entre os Martelos e os Crivos de 12mm (11).

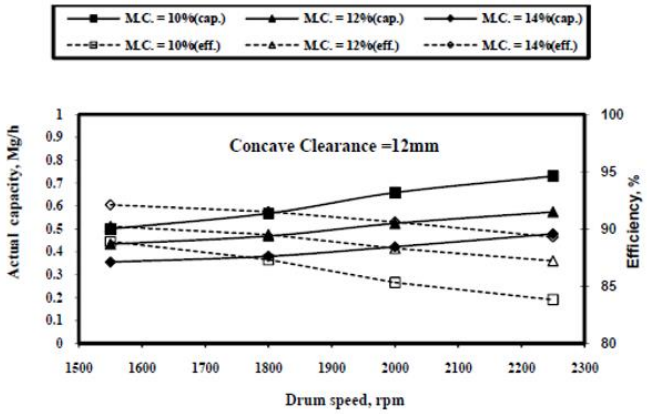


Figura 2.7 – Variação da Eficiência e da Capacidade de um Moinho de Martelos com a sua Velocidade de Rotação, para Martelos com Espessura de 5mm e Folga entre os Martelos e os Crivos de 12mm (11).

Os motores eléctricos mais utilizados nesta indústria operam a velocidade constante, no entanto, a instalação de **variadores de velocidade** permite o ajustamento dinâmico da velocidade à medida das necessidades. Graças a este controlo, os gastos energéticos, em vazio, podem ser reduzidos a fracções mínimas, sendo possível obter reduções até 60% na energia despendida, dependendo do tipo de motor e equipamento ao qual está acoplado (7).

Entre os diversos sistemas de controlo de velocidade de motores eléctricos de indução trifásicos de corrente alternada, os **variadores electrónicos de velocidade (VEV)** são a tecnologia dominante no mercado. Tal hegemonia deve-se principalmente ao facto de estes permitirem controlar a velocidade do processo com grande precisão, enquanto originam menor desgaste nos componentes mecânicos, menor ruído e poupanças energéticas significativas (12).

O controlo de velocidade associado à instalação de VEV's resulta da variação da frequência associada à modificação do formato das ondas da tensão de alimentação. Ao serem aplicadas aos enrolamentos do motor, as ondas de tensão modificadas alteram a curva binário-velocidade resultante da operação do motor, mantendo-se constante o binário de rotura e o declive na região de operação linear, como esquematizado na Figura 2.8. Deste modo, a velocidade do motor é proporcional à frequência gerada pelo variador (13), sendo dada pela seguinte expressão:

$$V_{me} = \frac{60 \times F}{P} \quad (2.1)$$

Onde V_{me} é a velocidade do motor eléctrico (rpm), F é a frequência de alimentação (Hz) e P se refere ao número de pares de polos desse mesmo motor.

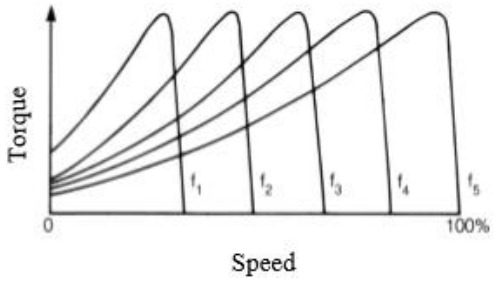


Figura 2.8 – Curvas Velocidade-Binário características de um Motor de Indução $f_1 < f_2 < f_3 < f_4 < f_5$ e $f_5 = 50Hz$ (14)

Existe um leque bastante alargado de equipamentos industriais accionados por motores eléctricos que podem beneficiar da instalação de VEV's. Entre os inúmeros exemplos mencionados na análise levada a cabo por Almeida et al (2000) (13), encontram-se a maioria das máquinas constituintes de uma fábrica de rações, tais como: mecanismos de transporte, ventiladores, compressores, sobrepressores e moinhos. Assim, o desafio passa pelo estudo dos impactes da implementação desta solução e consequente determinação do tempo de retorno do investimento em cada caso, de modo a concluir se tal investimento apresenta viabilidade.

Como é possível observar na Figura 2.109, os perfis de carga aplicados em máquinas accionadas por motores eléctricos podem ser divididas em três grandes grupos, dependendo do regime de variação do binário com a velocidade: cargas de binário constante, cargas de potência quadrática e cargas de binário quadrático. A potência mecânica despendida no funcionamento de cada equipamento resulta do produto entre o binário e a velocidade angular correspondente. Assim, o caso das cargas de binário quadrático é aquele em que a redução energética resultante da aplicação desta tecnologia, mais se destaca, já que nestas situações, a potência mecânica varia aproximadamente com o cubo da velocidade de rotação, pelo que apenas metade da potência nominal é suficiente para manter a máquina a 80% da sua velocidade nominal, movendo a mesma percentagem do caudal nominal (13).

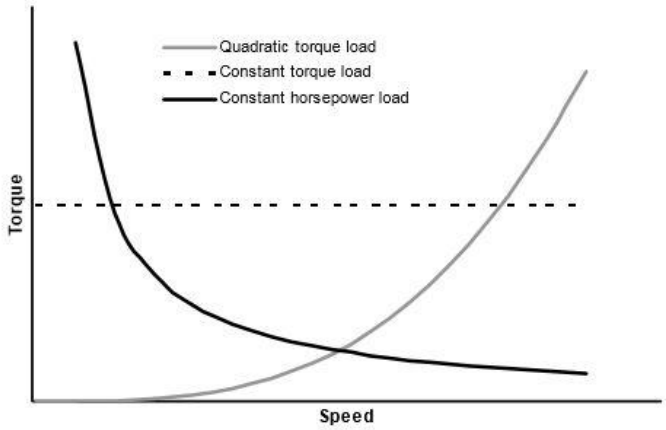


Figura 2.9 – Tipos de Curvas Binário-Velocidade (13).

Apesar de causar um impacte menor na potência de funcionamento, a instalação de VEV's em equipamentos com cargas de binário constante como compressores e sobrepressores

de parafuso ou de lóbulos (13) e (15) poderá também produzir poupanças significativas face a outros mecanismos de controlo de caudal, conforme apresentado na Figura 2.10 para os casos de controlo modular, controlo rotacional on/off e controlo recíproco, mas especialmente face a equipamentos sem qualquer controlo de caudal. Neste tipo de aplicações é ainda necessário assegurar que existe lubrificação adequada a velocidades reduzidas (13).

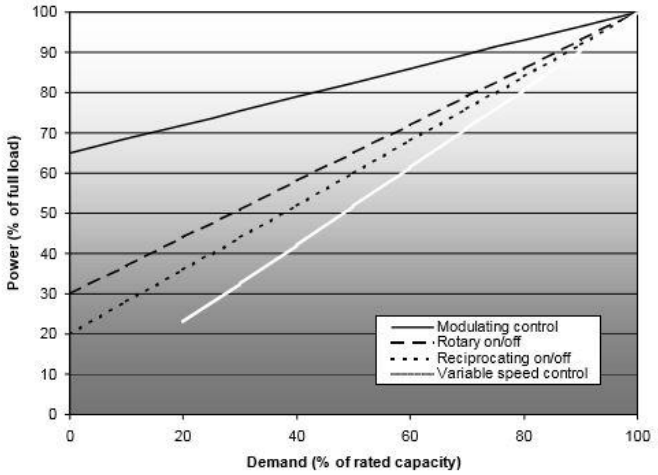


Figura 2.10 – Curvas de Variação da Potência Relativa com a Capacidade Utilizada, para Diversos Mecanismos de Controlo de Caudal (13).

Para além da redução do consumo energético, a instalação de VEV's ainda isola os motores da rede, o que poderá reduzir as tensões e ineficiências causadas pela variação e fraca qualidade das ondas de diferença de potencial fornecida pela rede ou por desequilíbrios entre fases.

No que concerne ao investimento inicial em VEV's, verifica-se que embora aumente em valor absoluto com a potência do motor a controlar, o custo específico [€/kWh] diminui. Como se constata na Figura 2.11, este decrécimo é mais acentuado em leques de potência mais reduzidos, acabando por estabilizar a partir de potências instaladas da ordem dos 70 kW. A figura apresentada representa ainda o custo médio total por kW, que inclui, para além do custo de aquisição do equipamento, os custos de instalação. Esta curva é influenciada pela acentuada diluição dos custos de instalação por kW, no caso das potências mais elevadas (12).

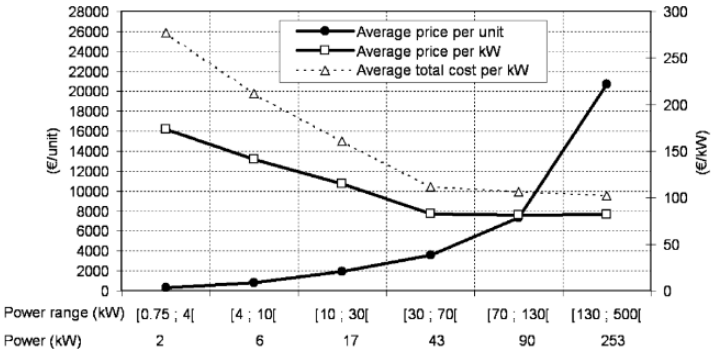


Figura 2.11 – Custos médios unitários e custos médios por kW de VEV's para diferentes intervalos de potências nominais na Europa (14).

Para além dos processos com maior consumo específico, é conveniente analisar as restantes etapas do sistema produtivo no sentido de identificar requisitos fundamentais do processo que possam, eventualmente, colocar restrições à optimização energética e produtiva de uma unidade industrial deste tipo.

O **doseamento da matéria-prima** é uma das etapas fundamentais na linha de produção típica de uma fábrica de rações, na medida em que é necessário garantir em simultâneo que se trata de uma operação precisa, de modo a que não existam desperdícios de matéria-prima e que o tempo necessário para a sua realização é minimizado, não influenciando o tempo de ciclo. Este processo pode ser decomposto em duas operações: transporte entre o silo de armazenamento e a balança, a abordar nos próximos parágrafos, e pesagem.

Os mecanismos de transporte contínuo de matéria-prima mais utilizados, para curtas distâncias, no panorama actual das fábricas de rações são os **transportadores de parafuso** e os **transportadores tipo corrente ou *redler***, representados nas Figuras 2.12 e 2.13. Os principais factores diferenciadores entre estes dois tipos de transportadores são os seguintes: o *redler* possui um custo inicial mais elevado, o transportador de parafuso tem um período de vida útil inferior, os custos de manutenção do *redler* são mais reduzidos e o transportador de parafuso apresenta menor fiabilidade para maiores distâncias (8).

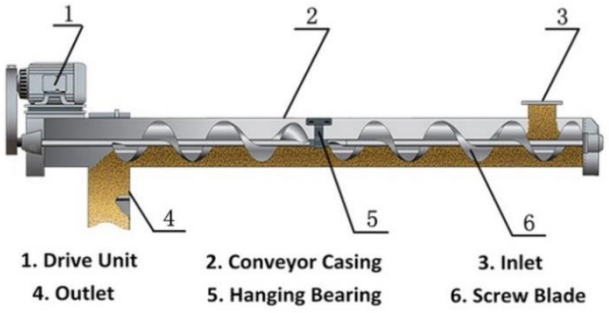


Figura 2.12 - Representação Esquemática de um Transportador de Parafuso (16)

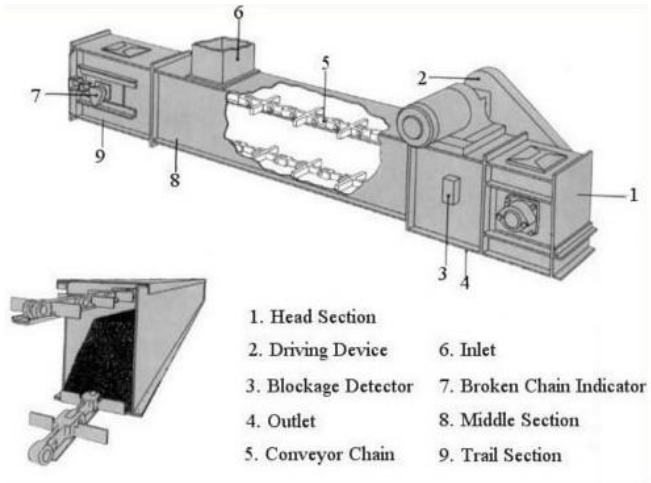


Figura 2.13 - Representação Esquemática de um Transportador Redler (16)

Durante o processo de transporte, a energia despendida tem como função vencer as forças de atrito, tanto entre o material a transportar e o próprio transportador como nos mecanismos de transmissão e apoios dos respectivos veios (fracção mais reduzida). No manual de dimensionamento de transportadores de parafuso disponibilizado pelo fabricante “KWS” em 2016 (16) é apresentado um método de dimensionamento de transportadores de parafuso tendo em conta que a potência nominal necessária deverá ser suficiente para superar as duas fontes atrito mencionadas. Este método contempla ainda uma possível inclinação dos transportadores através da multiplicação da potência necessária para transportar o material por um factor de

inclinação igual ou superior a 1, já que o efeito da gravidade é responsável por deslizamentos de material, levando a perdas de eficiência de transporte. A eficiência de um transportador de parafuso inclinado difere ainda consoante a geometria (caleira ou tubular) e o passo do mesmo, sendo que, como se observa na Figura 2.14, a conjugação de uma geometria inadequada com inclinações da ordem dos 45º pode levar a perdas de eficiência da ordem dos 90%.

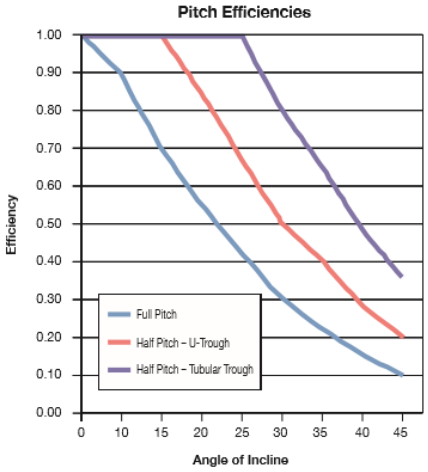


Figura 2.14 – Variação da Eficiência de Transporte com o Ângulo de Inclinação de um Transportador de Parafuso (16)

Assim, a potência necessária para o transporte de matérias-primas está directamente relacionada com o coeficiente de atrito dinâmico entre estas e a superfície do transportador. De acordo com uma investigação levada a cabo por Onu em 2010 (17), no caso do principal ingrediente da maioria das rações produzidas para a suinicultura, o milho, este coeficiente varia com o teor de água da matéria-prima a transportar e difere consoante o material constituinte da superfície do transportador, tal como se verifica na Figura 2.15.

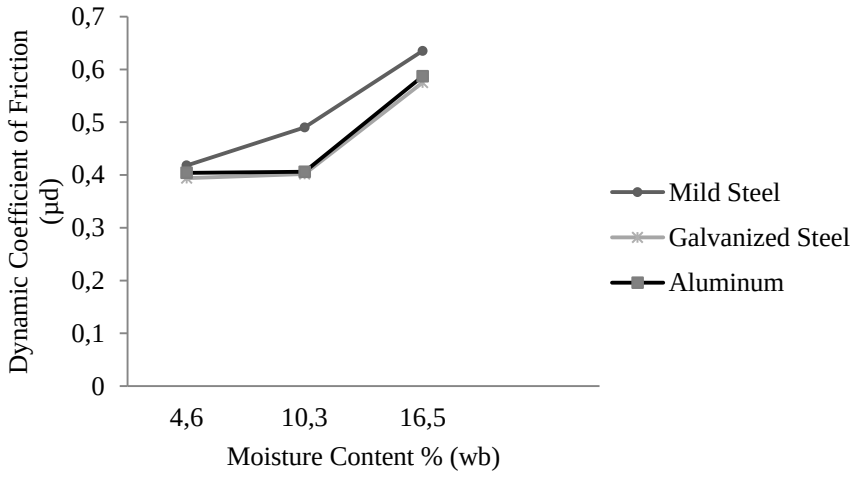


Figura 2.15 – Variação do Coeficiente de Atrito Dinâmico Entre o Milho e a Superfície de Transporte para Superfícies de 3 Metais Destintos (17)

Para além das oportunidades de melhoria típicas de unidades de produção de rações identificadas anteriormente, tendo em conta a redução exponencial dos custos de aquisição que se tem verificado num passado recente, a instalação de **painéis solares fotovoltaicos** pode constituir um investimento de valor para a maioria das indústrias, dependendo das necessidades energéticas e horários de produção. De acordo com um estudo conduzido por Cucchiella et al (2015), os sistemas de conversão fotovoltaica de energia solar num contexto industrial desempenham um papel crucial para a sustentabilidade global. Os incentivos financeiros atribuídos pela injecção na rede eléctrica nacional de electricidade produzida com recurso a esta tecnologia foram importantes para o aumento significativo da potência instalada que se tem

verificado à escala mundial nos últimos anos e representam uma ferramenta preferencial para o desenvolvimento de novos mercados. Contudo, em mercados onde esta tecnologia já atingiu um certo nível de maturação, como o português, a tendência é que tais subsídios deixem de existir. Assim, a rentabilidade desta tecnologia está completamente relacionada com a percentagem de energia produzida que é utilizada para autoconsumo. Deste modo, o dimensionamento da potência nominal a instalar deverá ser feito com base nas necessidades de consumo da instalação, de modo a minimizar o período de retorno do investimento. Este estudo refere ainda que a rentabilidade desta tecnologia tende a aumentar no futuro dado que o preço da electricidade fornecida pela rede tem tendência para crescer (18).

Para além do benefício económico, a adopção da tecnologia de conversão fotovoltaica num contexto global contribui para a diminuição da fracção de combustíveis fósseis no *mix* energético, tendo um potencial elevado para a redução de emissões de GEE e desempenhando um papel de relevo no alcançar das metas europeias.

Em Portugal, a produção de energia eléctrica com recurso a fontes de energia renovável é sujeita a um conjunto de requisitos legais com o objectivo de padronizar os procedimentos operacionais, tais como, registos e respectivas taxas, remunerações e condições de segurança a cumprir. À medida que o paradigma energético se altera, a legislação vai sofrendo modificações no sentido de se adaptar às condições presentes. No que concerne ao regime de autoconsumo, vigora o decreto-lei 153/2014, 20 de Outubro, complementado pela portaria nº14/2015, 23 de Janeiro. O modelo apresentado pressupõe a adequação da potência instalada ao perfil de consumo local, minimizando a quantidade de energia vendida à Rede Eléctrica de Serviço Público (RESP). O regime de autoconsumo engloba a produção energética renovável e não-renovável, excluindo apenas sistemas de produção regidos por legislação específica, tais como, a cogeração e baseia-se no pressuposto de que a produção anual deve ser inferior às necessidades de consumo, estabelecendo que a potência instalada não deverá exceder o dobro da potência de ligação. Fica ainda estabelecido que sistemas de produção energética ligados à RESP com potências superiores a 1,5 kW estão sujeitos a contagem por parte da rede e que o excedente instantâneo da produção será remunerado ao preço de mercado anunciado no Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE), sendo deduzida uma fracção de 10% correspondente aos custos de injecção na rede, de acordo com a seguinte fórmula:

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} \times OMIE_m \times 0{,}9 \tag{2.2}$$

Onde, $R_{UPAC,m}$ representa a remuneração da electricidade fornecida à RESP no mês "m" (euros), $E_{fornecida,m}$ simboliza a energia fornecida à rede no mês "m" (kWh) e $OMIE_m$ é o valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do OMIE para Portugal (mercado diário), relativo ao mês "m" (€/kWh).

No caso das Unidades de Produção de Autoconsumo (UPAC) representativas de 1% ou mais da potência total instalada no Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (240 MW, tendo por base os dados de 2015), estas estão sujeitas ao pagamento de uma compensação no sentido de recuperar uma parcela dos Custos de Interesse Económico Geral (CIEG) na tarifa de utilização global do sistema.

Actualmente existem diversas empresas portuguesas que já implementaram, com sucesso, este tipo de sistemas nas suas unidades industriais. Neste contexto têm sido realizados estudos técnico-económicos com o objectivo de estimar índices financeiros como o PRI (Período de Retorno do Investimento), de modo a avaliar a viabilidade de tais investimentos. Oliveira (2015) estimou que o PRI do projecto de uma UPAC fotovoltaica a instalar numa fábrica de componentes do sector automóvel em Palmela, com uma potência de 72 kWp seria de 5,8 anos (19). Posteriormente Costa (2016), estudou a implementação de um sistema semelhante, com uma potência de 472 kWp, numa Biorrefinaria localizada no Porto, concluindo que, caso fosse possível realizar o investimento com recurso a capital próprio, o PRI seria de aproximandamente 4 anos (20). Tendo em conta os casos de estudo mencionados, a instalação de uma UPAC de energia fotovoltaica afigura-se como uma solução com enorme potêncial económico para unidades industriais localizadas em Portugal.

Após a pesquisa bibliográfica efectuada, conclui-se que existem várias oportunidades de melhoria do desempenho energético e ambiental no sector industrial português em geral e na área da produção de alimentos compostos para animais, em particular. Com a elaboração deste trabalho pretende-se verificar a aplicabilidade de algumas das soluções descritas na literatura a um caso de estudo real, avaliando-se a mesma através de índices energéticos e ambientais, mas também financeiros, já que estes são, geralmente, um factor chave na tomada de decisão relativa ao investimento em novos processos e tecnologias. Assim, o objectivo deste estudo passa pela elaboração de um conjunto de sugestões de melhoria da eficiência energética da unidade industrial em estudo que possibilitem a redução do consumo específico, o decréscimo das emissões de GEE e a integração de energias renováveis, apresentando, em simultâneo, viabilidade económica.

3. Metodologia

O estudo de caso aqui apresentado é o culminar do processo de investigação inerente ao estágio realizado na unidade industrial de produção de rações, pertencente à Cooperativa Porto Alto – rações para animais, C.R.L.

3.1. Caracterização da Cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L

Com o objectivo de dar o seu contributo para a execução das metas europeias e nacionais, a Galp, em parceria com o Instituto Superior Técnico, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a Universidade de Aveiro, criou o programa Galp 20-20-20 de modo a possibilitar o desenvolvimento anual de 21 estudos tendo em vista a identificação de sistemas e comportamentos energéticos racionais aplicáveis em indústrias e edifícios concretos. Neste projecto de investigação em particular, o estudo de caso incidiu na unidade industrial da cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L.

A cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L opera no sector da produção de alimentos compostos para animais há mais de três décadas. Localizada no Porto Alto – Samora Correia, num eixo rodoviário estratégico, a cerca de 40 km de Lisboa, foi fundada em 1986 por um grupo de 17 produtores pecuários em busca de uma alternativa vantajosa no que concerne à relação qualidade-preço para o consumível com maior peso relativo nos custos das suas explorações, a ração dos animais. Dada a actividade dos seus associados, trata-se de uma empresa vocacionada para a suinicultura e bovinicultura, tendo nestas duas referências o seu principal fabrico. Ao longo dos anos, a cooperativa cresceu e estabilizou, o que se traduziu numa estrutura financeira sólida. Num passado mais recente colocou a sua enfâse na certificação, tendo obtido certificação relativa à segurança alimentar (HACCP / ISO 22000) e, no decorrer deste estágio, certificação do sistema de gestão da qualidade (ISO 9001). A eficiência energética passou também a integrar o leque de prioridades desta cooperativa, o que se reflectiu na candidatura ao projecto no qual este estágio está integrado, o programa Galp 202020.

As instalações desta cooperativa dividem-se em duas zonas:

- A fábrica de rações, que inclui a linha de produção, os silos de armazenamento de matéria-prima e os silos de armazenamento de produto final;
- A zona dos secadores de milho. É importante salientar que o processo de secagem do milho é sazonal, ocorrendo entre Setembro e Dezembro e, como tal, não foi analisado durante este estágio, que decorreu entre Março e Agosto.

O presente capítulo apresenta uma descrição do processo de fabrico, tal como a caracterização energética e mássica da unidade fabril, que servirá de base à estimativa dos consumos energéticos específicos em três níveis de detalhe destintos: divisão por zonas, divisão por processos e divisão por tipologia de equipamento. Com base nas conclusões desta caracterização, são apresentados os cenários de melhoria propostos e descritas as metodologias utilizadas para a avaliação de impactes de cada caso de estudo.

3.1.1. Descrição do Processo de Fabrico

A linha de produção da unidade fabril em estudo pode ser dividida em três grandes áreas: Recepção, Fabrico e Expedição, conforme apresentado na Figura 3.1. Para uma melhor compreensão do texto descritivo, apresentado infra, atribuiu-se uma letra a cada um dos processos mais relevantes. Assim, sempre que o mesmo for referido, será identificado pela respectiva letra entre parêntesis rectos. O diagrama de processos completo, que serviu de base à criação deste fluxograma, está presente no Anexo A.

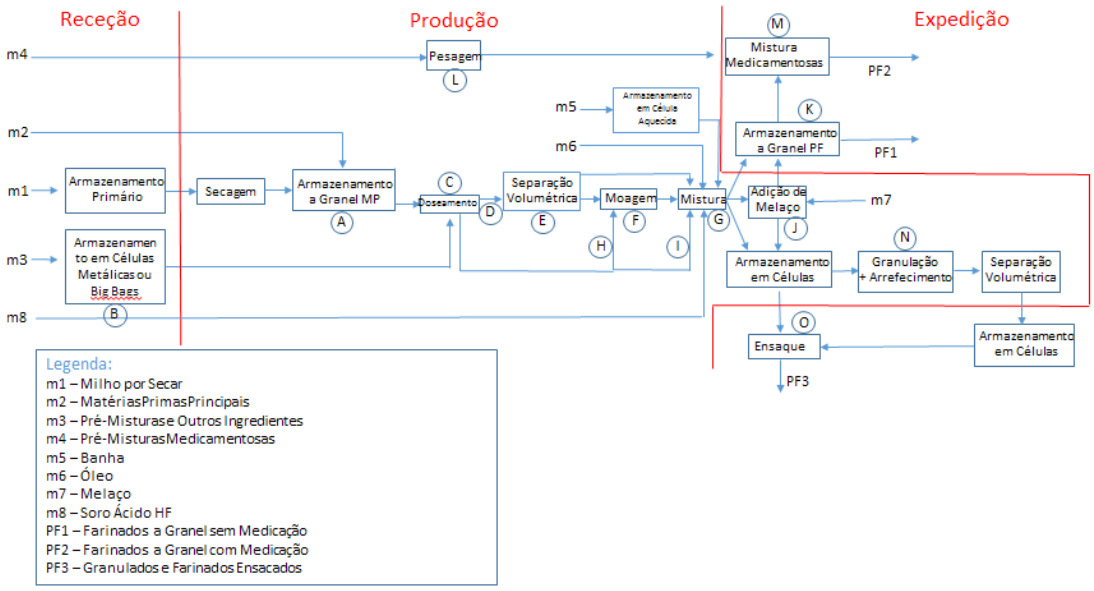


Figura 3.1 - Fluxograma produtivo da unidade fabril em estudo

Na zona de recepção, as matérias-primas utilizadas em maiores quantidades, como o milho, a cevada e o trigo, são colocadas directamente pelos fornecedores, com recurso a camiões de descarga, no tegão designado para este fim. Após serem recebidas, as matérias-primas principais são transportadas para silos de armazenamento utilizando transportadores *redler* e elevadores de alcatruzes. Posteriormente, executa-se o transporte do material para as células de doseamento, à medida das necessidades de produção, com recurso a equipamentos do mesmo tipo [A]. Os ingredientes utilizados em menores quantidades são adquiridos já ensacados, sendo colocados, com recurso a empilhadores, em células metálicas de dimensões reduzidas ou, utilizando directamente as embalagens originais (“big bags”), colocados numa estrutura de suporte [B] sob a qual existem transportadores de parafuso que irão ser responsáveis pelo doseamento após queda por gravidade.

O fabrico é efectuado por lotes, de massa total variável, que são processados em ciclos individuais de aproximadamente 2200 kg. Nesta fase, ocorrem 4 processos principais sequenciais: doseamento [C], transporte para a moagem [D], [E] e [H], moagem [F] e mistura [G]. Para que cada ciclo seja encaminhado para o processo seguinte, é necessário que a respectiva zona já tenha sido desocupada pelo ciclo anterior.

O doseamento [C] inicia-se quando, na sala de comando, é dada a indicação da receita a produzir. No seguimento desta ordem, os ingredientes são encaminhados para uma das quatro balanças existentes, consoante a precisão desejada, com recurso a transportadores de parafuso. As balanças 1 a 4 apresentam precisão entre 0,02 kg e 1 kg. O processo de doseamento em cada balança é sequencial. Após serem pesadas as quantidades desejadas de cada matéria-prima, os ingredientes utilizados em grande quantidade, pesados na balança 1, são encaminhados para a moagem através de um transportador *redler* e um elevador de alcatruzes, passando por um peneiro de granulados, responsável pela separação das partículas de menor dimensão [E], Desta forma, as partículas de grandes e pequenas dimensões são encaminhadas para células de armazenamento intermédio (“tremonhas”) diferentes. Por outro lado, os

ingredientes utilizados em quantidades inferiores, são pesados nas balanças 2 a 4 (de maior precisão) e o seu transporte para as respectivas tremonhas é efectuado com recurso a ar comprimido por dois sobrepressores (*blowers*) [H] e [I]. Destas matérias-primas secundárias, apenas as que são pesadas na balança 3 necessitam de ser moídas [H], sendo as restantes encaminhadas directamente para a mistura [I].

O processo seguinte é a moagem [F] dos grãos de maior dimensão, que são encaminhados para dois moinhos de martelos, que funcionam em paralelo, através dos seus alimentadores. Simultaneamente, os materiais de menores dimensões, pesados nas balanças 2 e 4, são transportados para a tremonha respectiva, onde ficam em repouso até que termine a moagem do ciclo em fabrico.

Terminada a moagem, todo o leque de ingredientes que tinham passado por processos distintos é submetido à acção da misturadora [G]. Durante a mistura são ainda introduzidas as matérias-primas no estado líquido [J] (actualmente é utilizada apenas a banha). Na vasta maioria das vezes, o *output* deste processo é já o produto final a fornecer aos clientes, existindo, porém, duas excepções: as rações granuladas, que representam uma fracção mínima da produção desta unidade fabril (0,3% da produção total de 2016); e as rações medicadas, que são ainda encaminhadas para um segundo processo de mistura onde são introduzidas pré-misturas medicamentosas, pesadas [L] e adicionadas manualmente, directamente na segunda misturadora [M].

No caso das rações granuladas, a farinha resultante do processo de mistura é encaminhada por um elevador de alcatruzes para a granuladora, onde, por efeito da força centrífuga exercida, as partículas se agregam na periferia da câmara de granulação, repleta de orifícios, levando a que as partículas formem cadeias de conglomerados cilíndricos, sendo posteriormente quebrados e libertados por acção da gravidade [N].

O processo de expedição [K] não é mais que o transporte dos lotes produzidos para os silos de armazenamento de produto final que lhes foram atribuídos no momento em que foi dada a ordem de fabrico, evitando a contaminação de silos que contenham receitas diferentes. Para este efeito são utilizados, uma vez mais, transportadores redler e elevadores de alcatruzes. Tal como ocorre com os fornecedores de matéria-prima na fase da recepção, os clientes finais são parte integrante do processo de expedição, na medida em que a ração sob a forma de farinha é expedida dos silos de armazenamento de produto final directamente para os camiões pertencentes às explorações pecuárias.

Existem novamente duas variações deste processo, com menor expressão em termos de volume de produção: as rações previamente ensacadas, vendidas a consumidores de menor dimensão, nas quais o processo típico de expedição é substituído por um processo de ensaque automático [O] e o produto ensacado é armazenado num espaço dedicado da instalação fabril com recurso a empilhadores; e as rações medicadas, para as quais, a jusante da misturadora de medicados, existe apenas um recipiente intermédio que contém uma raseira pneumática no fundo, sendo o produto final directamente expedido para os camiões dos clientes sem que haja armazenamento de produto final.

3.1.2. Caracterização Energética e Mássica do Processo

Analisando-se a facturação energética do ano transacto conclui-se que o processo de secagem do milho, que utiliza energia proveniente da combustão de gás natural e energia eléctrica, embora seja sazonal, ocorrendo em apenas três meses por ano, é responsável pela maior fracção do consumo energético anual, tendo consumido cerca de 231 tep face aos 191 tep alocados ao fabrico de rações em 2016. Concluiu-se ainda que o consumo global anual de energia primária na instalação é de cerca de 425 tep e como tal, esta unidade industrial não é abrangida pelo SGCIE. A distribuição de consumos de energia por fontes energeticas é apresentada na Figura 3.2.

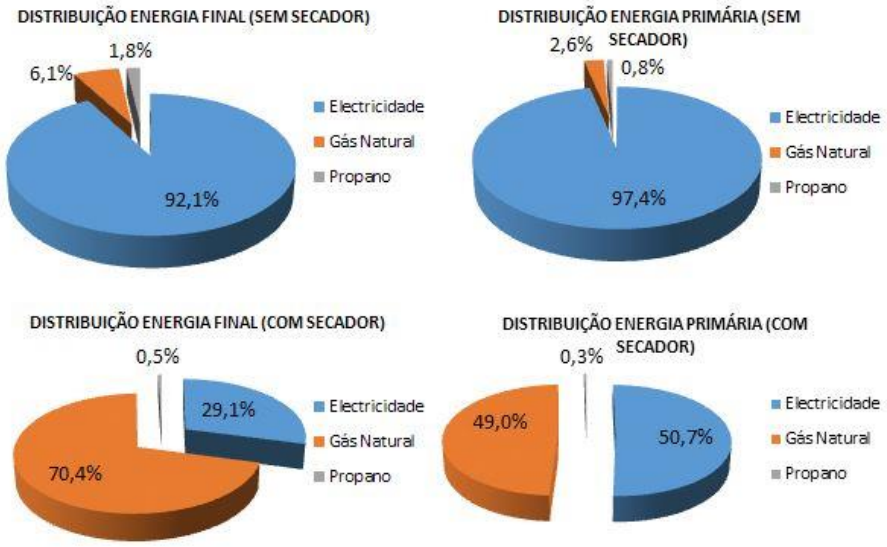


Figura 3.2 – Distribuição da Energia Primária e Final Consumida nas Unidade Fabril em Análise

Tendo em conta que a secagem do milho está fora do âmbito deste estágio, apresentam-se, na Tabela 3.1, os valores absolutos do consumo de energia relativos à fábrica de rações. Para efeitos de conversão de energia primária para final assumiram-se eficiências de 40% para a electricidade e 100% para o gás natural e o propano (21).

Tabela 3.1 – Distribuição do consumo anual de energia primária e final em 2016 por vector energético

Energia	Energia Final [tep]	Energia Final	Energia Primária [tep]	Energia Primária
Electricidade	73,9	92,1%	184,8	97,4%
Gás Natural	4,9	6,1%	4,9	2,6%
Propano	1,5	1,8%	1,5	0,8%
Total	80,2	100,0%	191,1	100,0%

Constata-se que, a maioria dos equipamentos presentes nesta instalação fabril têm como fonte energética a electricidade. O gás natural é utilizado apenas em duas caldeiras de pequena dimensão que têm como finalidade manter a banha a uma temperatura superior à sua temperatura de fusão e o gás propano é utilizado em dois empilhadores cuja função é colocar as matérias-primas utilizadas em menores quantidades nas respectivas células de armazenamento ou aproveitando os *big bags* em que são comercializadas, directamente nos sistemas de alimentação da linha de produção.

Relativamente às matérias-primas utilizadas no processo de produção de rações desta cooperativa, estas dividem-se em quatro grandes categorias:

- As matérias-primas adquiridas a granel, que são a base das rações produzidas, incluem cereais, principalmente milho, trigo, aveia, cevada e soja mas também sementes e subprodutos do fabrico de farinhas tais como a sêmea de trigo;
- O milho por secar, a utilizar sazonalmente nos secadores;
- As pré-misturas e outros ingredientes, usadas em quantidades reduzidas, como suplementos alimentares, das quais fazem parte diversos aminoácidos como a metionina, a treonina e a valina;
- As pré-misturas medicamentosas, a incluir nas receitas comuns em caso de pedidos específicos, sob receita médica

Apresenta-se na Tabela 3.2 e Figura 3.3 a distribuição das matérias-primas utilizadas em 2016, que servirá de referência a todos os valores de base mássica presentes ao longo deste estudo.

Tabela 3.2 – Distribuição Absoluta e Relativa dos Consumos Mássicos em 2016

Matéria-prima	Consumo Anual [ton]	Consumo Anual (%)
Milho por secar	15867	21,26%
Matérias-primas a granel	55108	73,85%
Pré-misturas e outros ingredientes	2449	3,28%
Pré-misturas medicamentosas	64	0,09%
Banha	1021	1,37%
Melaço	10	0,01%
Ingredientes de adição manual	98	0,13%
Total	74618	100,00%

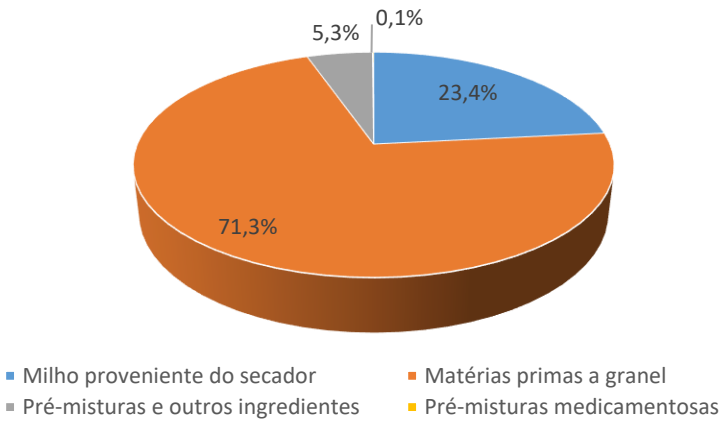


Figura 3.3 - Distribuição dos Consumos Mássicos em 2016

No que concerne ao produto acabado, esta unidade industrial dedica-se maioritariamente ao fabrico de rações farinadas, podendo ser, ou não, medicadas, fornecidas a granel, aos transportadores das explorações pecuárias, conforme apresentado na Figura 3.4. Na figura apresentada está ainda presente a produção em pequena escala de rações ensacadas, sendo que neste caso, para além de farinados, também se produzem granulados.

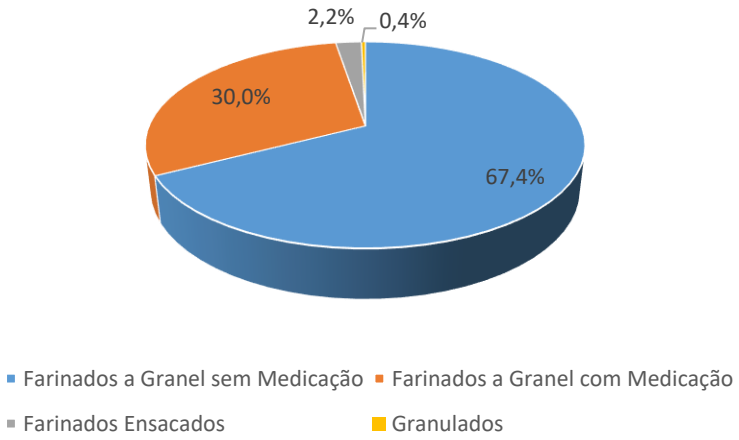


Figura 3.4 – Distribuição do Produto Final em 2016

A instalação fabril da cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L, tem adoptado num passado recente uma filosofia de melhoria contínua, tendo começado já o processo de implementação de uma nova plataforma de monitorização de dados, tendo em vista, a análise detalhada do consumo energético por processo e por equipamento num futuro próximo. Uma vez que, durante o período de duração deste estágio, a plataforma referida ainda não se encontrava em funcionamento, a primeira fase deste projecto consistiu na modelação da distribuição energética da fábrica, de modo a identificar possíveis ineficiências e focos de melhoria. Elaborou-se então um modelo do consumo energético fabril, recorrendo aos dados disponíveis:

- Tempo total de funcionamento de cada equipamento, registado no *software* de aquisição de dados actual (sem distinção entre funcionamento em carga e em vazio para a maioria dos equipamentos);
- Intensidade de corrente instantânea, medida com um multímetro em cada fase de cada motor trifásico;
- Tempo de funcionamento em carga de cada equipamento, medido com recurso a um cronómetro e um multímetro ou a um cronómetro em conjunto com o *sofware* de controlo em tempo real presente na sala de comando.

De modo a simplificar o modelo de consumo energético fabril, com um impacte desprezável nos resultados finais, foram considerados os seguintes pressupostos simplificativos: não se consideraram os processos de granulação e ensaque, já que se tratam de actividades esporádicas, tendo contribuído em 0,4% e 2,2%, respectivamente, para a produção total de 2016 e não se levou em consideração o consumo da melaçadora uma vez que o melaço deixou de ser integrado nas receitas após o primeiro trimestre de 2016, correspondendo a apenas 0,01% das matérias-primas utilizadas no ano transacto. Deste modo, o fluxograma de funcionamento da linha de produção simplifica-se, assumindo a seguinte estrutura:

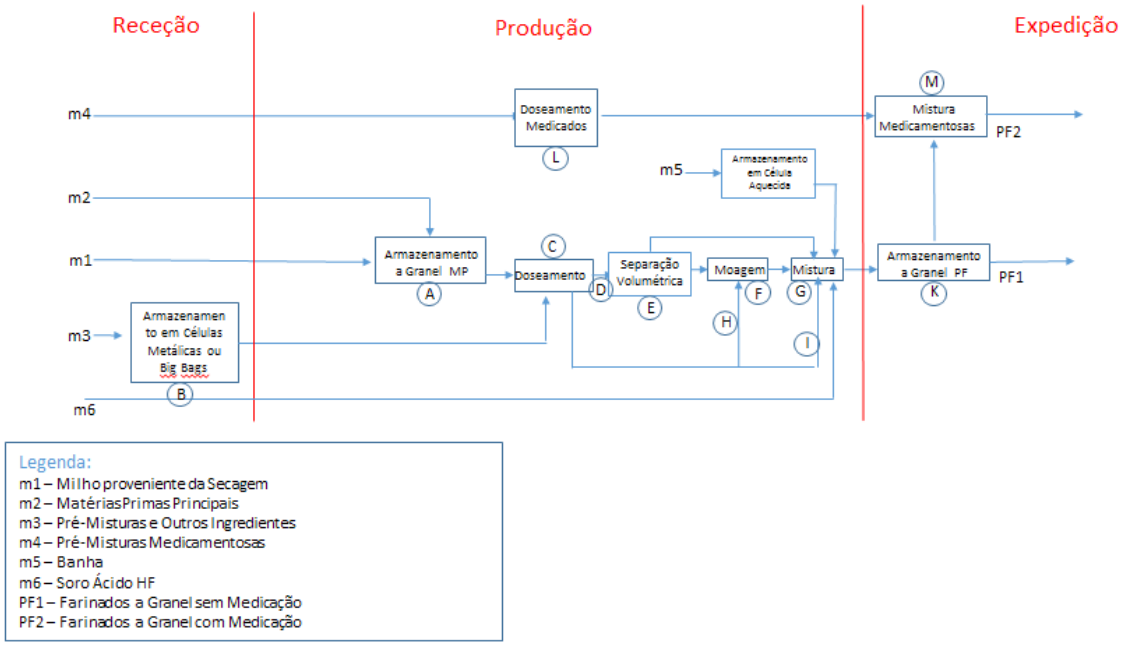


Figura 3.5 - Fluxograma produtivo simplificado da unidade fabril em estudo

Analisando com maior pormenor o troço mais utilizado da produção, com início no doseamento e término na expedição com destino ao armazenamento a granel de produto final, é possível sistematizar o percurso de dois ciclos consecutivos através da seguinte lista de precedências:

Tabela 3.3 – Lista de Precedências entre Processos de Dois Ciclos Consecutivos

Descrição	Processo	Precedências
Doseamento (Pesagem + Preparação Descarga)	C1	-
Descarga	D1	C1
Transporte Moagem	E1	C1
Transporte Blower 3	H1	C1
Moagem	F1	D1,E1,H1
Transporte Blower 2	I1	D1,E1,H1
Mistura + Retenção Pós-Mistura	G1	I1,F1
Expedição (Armazenamento a Granel PF)	K1	G1
Doseamento (Pesagem + Preparação Descarga) (Ciclo 2)	C2	D1
Descarga (Ciclo 2)	D2	C2,E1,H1
Transporte Moagem (Ciclo 2)	E2	C2
Transporte Blower 3 (Ciclo 2)	H2	C2
Moagem (Ciclo 2)	F2	D2,E2,H2,F1
Transporte Blower 2 (Ciclo 2)	I2	D2,E2,H2,I1
Mistura + Retenção Pós-Mistura (Ciclo 2)	G2	I2,F2,G1
Expedição (Armazenamento a Granel PF) (Ciclo 2)	K2	G2,K1

De modo a estudar o consumo energético desta unidade fabril por processo, foi necessário alocar os vários equipamentos aos processos identificados no fluxograma apresentado. Com o objectivo de evitar a inclusão de um processo sem valor acrescentado, incluíram-se os equipamentos de transporte nos processos imediatamente a jusante. A título de exemplo, o transportador *redler* e o elevador de alcatruzes, cuja função é transportar a matéria-

prima do doseamento até à moagem, foram incluídos no processo de moagem. A lista de equipamentos considerados e respectivo processo onde se inserem está presente na secção 7 (Anexo B).

Para a **aferição da potência** utilizaram-se dois métodos distintos: o levantamento da potência nominal de cada máquina e a medição da intensidade de corrente (em carga e em vazio) com recurso a um multímetro e posterior cálculo da potência activa de cada motor trifásico, com recurso à seguinte equação (22):

$$P = \sqrt{3} \times I \times V \times \cos\phi \tag{3.1}$$

Onde P representa a potência instantânea (W), I simboliza a intensidade de corrente (A) e V é a diferença de potencial (V).

Este cálculo foi realizado tendo em conta que, nesta instalação fabril, a diferença de potencial aplicada a todos os motores eléctricos é de 400 V e o valor médio do $cos\emptyset$ é de 0,8.

Para efeitos de **análise de tempo de funcionamento** de cada equipamento, consultaram-se os registos gráficos presentes no *software* da sala de comando fazendo-se o levantamento manual dos períodos em que cada motor eléctrico esteve ligado em duas semanas distintas, a de maior e a de menor produção dos últimos dois anos, 7 a 11 de Março de 2016 e 20 a 24 de Fevereiro de 2017, respectivamente, de modo a que fosse possível analisar o impacte do volume de produção na fracção de energia consumida por processo e por equipamento.

Este método de aferição dos tempos de funcionamento permite-nos apenas avaliar o tempo em que os diversos equipamentos estiveram ligados. No entanto, a vasta maioria das máquinas presentes na linha de produção funcionam em dois estados distintos: em carga, quando estão a processar material; e em vazio, nos períodos que ocorrem entre a passagem de dois ciclos diferentes da mesma receita ou entre lotes de receitas diferentes, apresentado perfis de consumo distintos para cada um dos estados.

Após a medição da intensidade de corrente de cada equipamento em ambos os estados e o tempo de funcionamento semanal, o passo seguinte consistiu na estimativa das **fracções de tempo em carga**. Para esse efeito, realizou-se uma medição dos tempos de funcionamento em carga com recurso a um multímetro e a um cronómetro, iniciando-se a cronometragem no momento em que a intensidade de corrente aumentava após um período estável de reduzido consumo e finalizando-se a mesma no instante em que a intensidade voltava a estabilizar no valor inicial.

Posteriormente, estimou-se o **"tempo de ciclo"**, isto é, o período de tempo entre a chegada aos silos de armazenamento de produto final de dois ciclos consecutivos de 2200 kg. O tempo de ciclo médio estimado inclui transições entre receitas diferentes, já que estas são mais demoradas por incluírem um tempo mínimo de limpeza do circuito de forma a evitar a contaminação entre receitas diferentes – tempo de *setup*. Para este efeito converteu-se a cadência de produção média calculada pela gestão da produção para a semana em estudo (em toneladas por hora) para o respectivo tempo de ciclo, considerando que todos os ciclos têm a mesma massa. Do quociente entre o "tempo em carga" e o "tempo de ciclo" resultou a fracção de tempo em carga de um dado equipamento.

Na unidade fabril em estudo são produzidos diversos tipos de rações. A vasta maioria das quais se destinam à alimentação de suínos, embora exista também produção de rações para bovinos, numa escala menor e ainda, esporadicamente, para outros animais, tais como, borregos. Por sua vez, existem múltiplas fórmulas de rações para cada tipo de efectivo. Dada a multiplicidade de receitas que a fábrica produz, verifica-se que o consumo energético dos equipamentos constituintes da linha de produção, sofre ligeiras variações, dependendo da fórmula seleccionada. Esta variação deve-se sobretudo às diferenças de massa específica entre ingredientes. Uma ração que apresente na sua constituição maior quantidade de um determinado ingrediente, de menor massa específica, vai ocupar um maior volume. Uma vez que a produção é efectuada em ciclos de aproximadamente 2200 kg independentemente da receita seleccionada, uma fórmula mais volumosa vai demorar mais tempo a ser transportada, levando a um aumento do tempo de funcionamento "em carga" dos equipamentos de transporte e por outro lado, a um consumo instantâneo menor, gerando ligeiras discrepâncias no consumo

energético entre rações. Outro factor responsável pela variabilidade referida é a dimensão da malha utilizada nos crivos dos moinhos de martelos, já que esta varia consoante a fórmula a produzir, sendo que uma malha mais fina irá exigir maior tempo de moagem. Uma vez, que as variações entre a maioria das medições de intensidade de corrente e tempo de processamento, não apresentaram discrepâncias significativas, optou-se por realizar a análise estatística do produto final como um todo, executando-se posteriormente uma análise dos desvios-padrão, de modo a testar a validade desta hipótese.

Uma vez que a linha de produção contempla um total de 140 motores eléctricos, não seria viável cronometrar o tempo em carga de cada equipamento cumprindo o número mínimo de cronometragens que garante um nível de confiança de 95% (Z=2) e um erro relativo de 5% (p=0,05). Este valor mínimo de cronometragens a efectuar calculou-se com recurso à equação 3.2, apresentada por Peças e Henriques em (23).

$$\mathrm{N} = \frac{z^2\sigma^2}{p^2\bar{x}^2} \tag{3.2}$$

Onde N representa o número mínimo de cronometragens para a confiança e precisão pretendidas, Z é o número de desvios padrão que define a amplitude do intervalo de confiança para o nível de confiança pretendido, σ é o desvio padrão, p simboliza o erro relativo e $\bar{x}$ é o valor médio.

Assim, optou-se por cronometrar o funcionamento das máquinas com maior influência no tempo de cada processo e seguidamente extrapolar os valores obtidos para os restantes equipamentos do mesmo tipo.

Para efeitos de estimativa do **consumo energético** com recurso ao cálculo da potência activa considerou-se então a média ponderada da energia calculada (kWh) com recurso à intensidade de corrente (A) de um equipamento "i", medida em carga e em vazio (E_{ic} e E_{iv}, respectivamente) pelas fracções de tempo em carga e em vazio (f_{kc} e f_{kv}, respectivamente) características da tipologia de equipamento correspondente, "k", através da seguinte equação:

$$E_i = E_{i_v} \times f_{k_v} + E_{i_c} \times f_{kc} \tag{3.3}$$

Existe apenas um componente na instalação ao qual o método não se aplica exactamente como acima descrito: o compressor responsável pela produção de ar comprimido que alimenta todos os actuadores electro-pneumáticos (raseiras), existentes na fábrica. Este componente é alugado a uma empresa externa, pelo que não é abrangido pelo *software* de controlo, não existindo registos precisos do tempo que esteve ligado. Por observação constata-se que o compressor se encontra ligado desde o momento em que a actividade fabril se inicia até ao seu término já que mesmo fora do horário de fabrico, o seu trabalho é necessário para que os actuadores pneumáticos responsáveis pela recepção da matéria prima e expedição do produto acabado se mantenham em funcionamento. Após registo da intensidade de corrente utilizada pelo componente ao longo de uma semana, concluiu-se que esta aumenta ligeiramente nas horas de fabrico. Assim, definiu-se a fracção de funcionamento em carga do compressor como sendo o quociente entre o número de horas de fabrico nas semanas em análise e o número total de horas semanais de actividade fabril.

Seguindo o procedimento descrito, nos parágrafos anteriores, obtiveram-se os seguintes tempos médios de funcionamento em carga:

Tabela 3.4 – Estudo dos tempos característicos de cada processo

Operação	Principais Equipamentos	Tempo Médio em Carga [min]	Desvio Padrão [min]	Desvio Padrão	Número Mínimo de Cronometragens
Pesagem	Bal01	3,44	0,27	7,9%	10
Preparação da Descarga	-	0,60	0,33	55,6%	502
Descarga	Rz051	0,34	0,03	9,9%	16
Transporte para Moagem	T053	3,02	0,33	11,1%	20
	E054	3,22	0,42	13,0%	27
	Bw3	0,48	0,02	3,4%	1
Moagem	M1/M2	3,40	0,27	7,8%	10
Transporte Blower 2	Bw2	1,18	0,25	21,1%	76
Mistura	MX01 + Rz077	2,60	0,14	5,2%	4
Expedição (Armazenamento a Granel PF)	T078	3,27	0,36	11,1%	20

Verifica-se que o desvio padrão máximo introduzido no processo pelas diferenças na massa específica e diâmetro médio de grão de cada receita é de 13% em relação ao tempo médio de cada processo, exigindo um número mínimo de observações exequível para todos os equipamentos em análise. A única excepção a esta regra são os processos de "preparação da descarga" e "transporte Blower 2", presentes na segunda e sexta linha da Tabela 3.4 respectivamente. Após discretização dos tempos registados de acordo com as receitas em fabrico, concluiu-se que estes desvios são na sua maioria introduzidos na amostra pelas medições efectuadas no decorrer da produção da ração S800. O desvio comportamental em relação à média nestas duas fases do fabrico, deve-se ao facto de esta fórmula incluir, aproximadamente, o triplo de matérias-primas pertencentes à categoria "Pré-Misturas", que se encontram armazenadas em Big Bags. O transporte destes materiais para a mistura é feito com recurso a sobrepressores (blowers) e nesta fórmula, em particular, é cerca de 3 vezes mais demorado que a média, já que a massa a transportar é superior na mesma proporção. Uma vez que o processo de Transporte de Pré-Misturas para a Misturadora, levado a cabo pelo Blower 2, é uma precedência dos processos de "Descarga", "Transporte para Moagem" e "Transporte Blower 3" do ciclo seguinte, existe um aumento significativo do "Tempo de Preparação de Descarga" desse mesmo ciclo, como fica explícito na Figura 3.6.

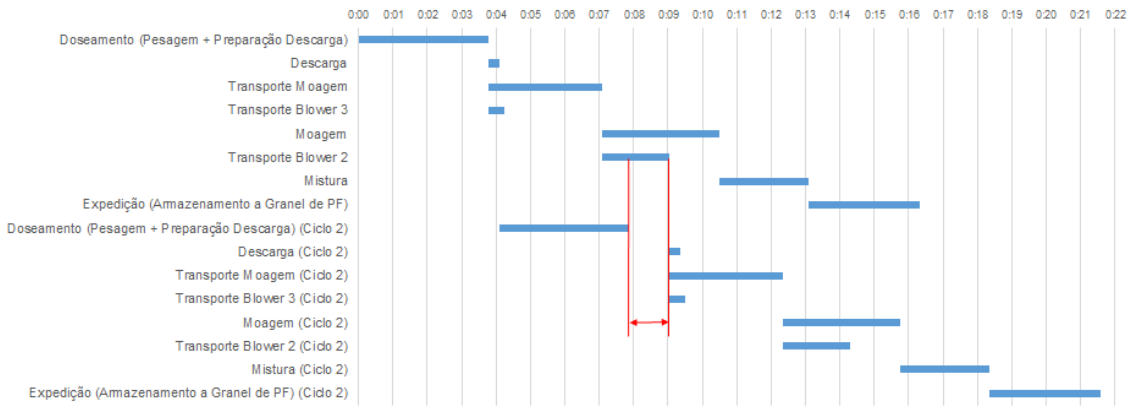


Figura 3.6 – Diagrama de Gantt Representativo do Caso Particular do Fabrico da Receita S800 (2 ciclos consecutivos)

Após reunião com a empresa responsável pela automação do sistema, constatou-se que esta situação não era até à data do seu conhecimento e que poderia ser facilmente resolvida, alterando o código presente nos autómatos responsáveis pela regulação do caudal de matérias-

primas, a ser transportado pelos sobrepressores, de modo a aumentar esse mesmo caudal para esta fórmula em específico. Este procedimento não põe em causa o correcto funcionamento do mecanismo de transporte pneumático, uma vez que, actualmente, os sobrepressores estão sobredimensionados em relação ao caudal que transportam, o que se traduz em carregamentos máximos da ordem dos 50% da potência nominal. Consultaram-se ainda os registos de produção de 2016 e concluiu-se que esta receita constituiu apenas 9% da produção anual. Assim, dado o carácter temporário da situação mencionada, optou-se pela realização de uma nova análise de variabilidade sem a inclusão dos efeitos causados por esta fórmula em particular, cujos resultados são apresentados em seguida.

Tabela 3.5 – Estudo dos tempos característicos de cada processo sem inclusão da fórmula S800

Processo	Equipamentos	Tempo Médio em Carga [min]	Desvio Padrão [min]	Desvio Padrão	Número Mínimo de Cronometragens
Pesagem	Bal01	3,41	0,26	7,5%	9
Preparação da Descarga	-	0,38	0,03	8,7%	10
Descarga	Rz051	0,34	0,03	9,3%	14
Transporte para Moagem	T053	3,25	0,17	5,3%	4
	E054	3,35	0,34	10,1%	16
	Bw3	0,48	0,02	3,4%	1
Moagem	M1/M2	3,45	0,28	8,2%	11
Transporte Blower 2	Bw2	1,02	0,07	6,6%	6
Mistura	MX01+Rz077	2,58	0,16	6,4%	7
Expedição (Armazenamento a Granel PF)	T078	3,28	0,37	11,2%	20

Verifica-se que, tal como conjecturado, os elevados valores de desvio padrão do tempo medido por processo deixam de existir quando se retiram da amostra os tempos relativos à fórmula S800. Deste modo, para efeitos do cálculo das fracções de tempo de funcionamento em carga de cada máquina, considerando o conjunto de rações produzidas como um todo, irão utilizar-se os tempos médios presentes na Tabela 3.5, que dão origem ao diagrama de Gantt apresentado naFigura 3.7.

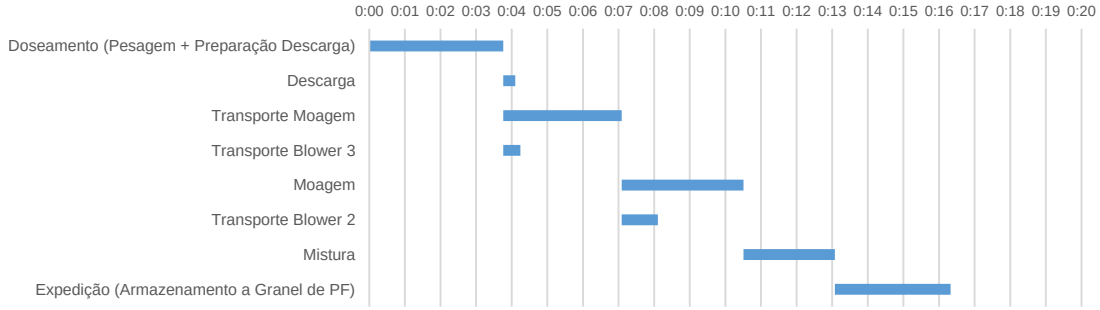


Figura 3.7 – Diagrama de Gantt dos tempos médios de processamento excluindo os efeitos da fórmula S800

O estudo dos tempos efectuado foi fulcral para que se percebesse qual o processo a melhorar no sentido de aumentar a cadência de produção. Da análise apresentada fica explícito que, actualmente, o processo que limita o tempo de ciclo é conjunto dos tempos de pesagem (incluindo o transporte das matérias-primas até à balança) e a preparação para a descarga.

Analisando o código na génese do *software* de automação da linha de produção, verificou-se que o tempo de preparação para a descarga existente é necessário para a qualidade

do processo, sendo responsável por garantir a precisão dos valores da massa medida pelas células de carga e incluindo temporizações que evitam a contaminação entre diferentes ciclos e lotes. Deste modo, resta que se actue sobre o tempo de pesagem, que é constituído pelo doseamento dos ingredientes de cada receita com recurso a transportadores de parafuso ou raseiras. Uma vez que o ingrediente principal das rações produzidas é o milho, que é utilizado em quantidades de até 990 kg, naturalmente, o seu doseamento é o mais demorado. Para esta demora contribui ainda o facto dos mecanismos de doseamento do milho apresentarem uma disposição que não lhes confere eficiência de transporte, como veremos na secção 3.2.3 onde se analisa uma possível solução para este problema e o seu impacte no consumo energético específico da unidade fabril.

Como referido anteriormente, os tempos médios de ciclo foram estimados com recurso aos dados do histórico de cadências de produção médias diárias desta unidade industrial. A título de exemplo, apresenta-se, em seguida o cálculo efectuado para a semana de menor produção (20-24 de Fevereiro de 2017), em que se registou uma cadência média de 20,5 [ton/h].

(3.4)

$$TempoMédioDeCiclo = \left(\frac{20{,}5 \frac{ton}{h}}{60 \frac{\min}{h}} \right) \times 2{,}2 \frac{ton}{ciclo} = 6{,}44 \frac{\min}{ciclo}$$

Na Tabela 3.6 apresentam-se as fracções de tempo em carga obtidas com base na média dos tempos recolhidos, para cada tipologia de equipamento, para a mesma semana.

Tabela 3.6 – Fracções de Tempo de Funcionamento em Carga Médias por Tipologia de Equipamento

Tipologia de Equipamento	Tempo Médio de Ciclo [min]	Tempo Médio em Carga [min]	Fracção de Tempo em Carga [%]
Elevadores de Alcatruzes	6,44	3,35	52%
Transportadores Redler	6,44	3,27	51%
Ventiladores	6,44	3,45	54%
Blowers	6,44	0,85	13%
Moinhos	6,44	3,45	54%
Outros	6,44	3,42	53%
Misturadoras	6,44	2,58	40%

Considerando que, em períodos de funcionamento normal, a fábrica opera em dois turnos de 8 horas e que o tempo de produção diário médio é de 10 horas, a fracção de tempo em carga do compressor é de 63%.

Tendo estimado as fracções de tempo em carga, medido as intensidades de corrente em carga e em vazio para cada equipamento e consultado os tempos totais de funcionamento nas semanas em análise, calculou-se a energia despendida por cada equipamento, com recurso à equação (3.3). Com o intuito de agrupar a informação de modo a que fosse possível ter uma noção do consumo energético em vários planos, com diferentes níveis de detalhe, sem sobrecarregar esta secção com os valores de consumo particular de 140 motores eléctricos, apresentam-se os resultados obtidos por: zona fabril (Figura 3.8), processo (Figura 3.9) e tipologia de equipamento (Figura 3.10). Esta análise encontra-se também presente, em anexo, sob a forma de tabela.

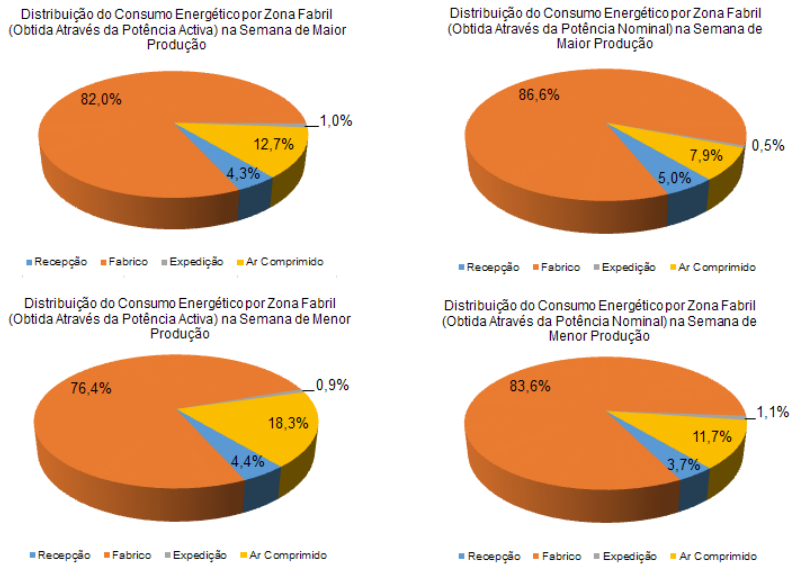


Figura 3.8 – Distribuição do Consumo Energético por Zona Fabril

Observando a Figura 3.8, conclui-se que o fabrico é, por uma larga margem, a actividade de maior relevo da factura energética desta cooperativa. Este resultado está de acordo com o que seria de esperar na medida em que a vasta maioria da potência instalada está alocada ao fabrico (117 de 140 motores eléctricos) e esta é a única zona cuja maioria das máquinas estão ligadas continuamente desde que se inicia a produção diária de rações até ao término na mesma.

No que concerne à distribuição do consumo energético por processo (Figura 3.9), verifica-se que mais de metade do consumo da fábrica tem como objectivo a moagem das matérias-primas, pelo que este processo foi um dos principais focos de estudo. Destacam-se ainda os processos de produção de ar comprimido e mistura. Embora a produção de ar comprimido contemple apenas um equipamento, o compressor, apresenta um peso relevante para o consumo total já que se trata de um dos equipamentos com maior potência nominal, 30 kW, sendo, simultaneamente, o que apresenta maior tempo de funcionamento.

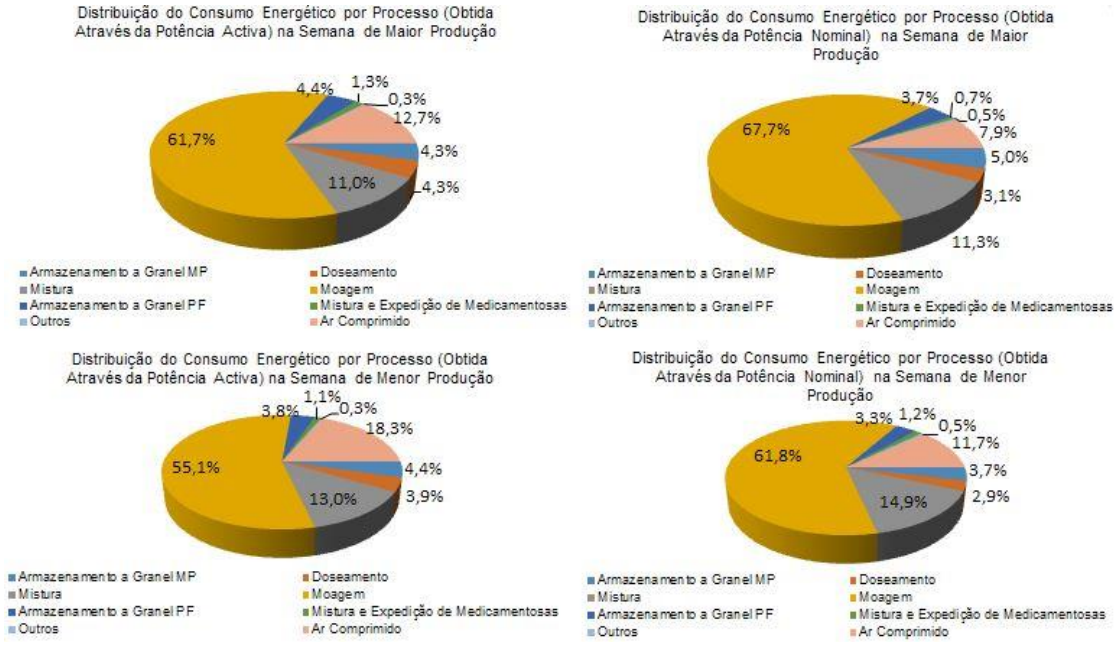


Figura 3.9 – Distribuição do Consumo Energético por Processo

Em relação ao consumo energético alocado à mistura, verifica-se na Figura 3.10 que o equipamento principal, a misturadora, não figura entre os maiores consumidores de energia. No entanto, o transporte das partículas finas para este processo é executado com recurso a um dos sobrepressores (blowers) com 22k W de potência nominal que, embora apresente a fracção de tempo em carga mais reduzida, está ligado durante praticamente todo o tempo de fabrico, apresentando um consumo elevado e inflacionando a energia alocada à mistura. Esta ineficiência identificada no funcionamento dos sobrepressores justificou um dos cenários de melhoria investigados, a instalação de variadores electrónicos de velocidade nos sobrepressores, conforme será apresentado na Secçao 3.2.2.

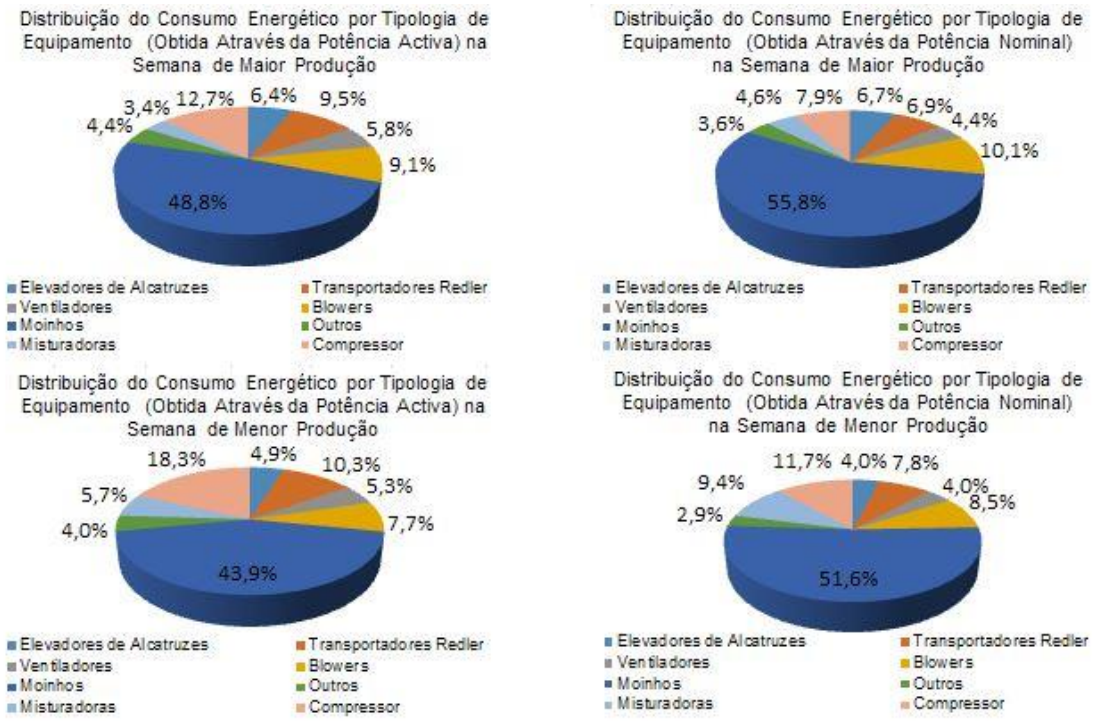


Figura 3.10 – Distribuição do Consumo Energético por Tipologia de Equipamento

Analisando a distribuição do consumo energético fabril, por tipologia de equipamento (Figura 3.10) verifica-se que, dependendo do método utilizado, a fracção atribuída aos moinhos de martelos se situa entre os 43,9% e os 55,8%. Apesar de se tratarem dos equipamentos responsáveis pela maior parcela do consumo, estes valores são significativamente inferiores aos da moagem como um todo (Figura 3.9). Os principais factores responsáveis por esta diferença são: a inclusão de um sobrepressor, responsável pelo transporte das matérias-primas secundárias que necessitam de moagem, com as mesmas características do equipamento homólogo descrito no parágrafo anterior; e a presença dos ventiladores dos moinhos que embora menos potentes, acabam por estar ligados durante a maioria do tempo de fabrico. Existe ainda uma percentagem significativa da energia a ser utilizada pelos transportadores *redler*, facto que era expectável na medida em que este é um dos mecanismos de transporte mais utilizados na instalação, existindo um total de 32 transportadores deste tipo, o que perfaz uma potência instalada de 105 kW.

Comparando as duas semanas em estudo, salientam-se duas diferenças principais na distribuição do consumo energético, a fracção consumida pelas misturadoras foi maior na semana de menor produção, sucedendo-se o mesmo com o compressor. O maior peso relativo das misturadoras na factura energética de Fevereiro de 2017 deve-se à substituição da misturadora principal no mês anterior, sendo que o equipamento instalado actualmente apresenta o dobro da potência nominal do seu homólogo existente até à data, o que naturalmente, mesmo considerando que a misturadora nova é mais eficiente, leva a um consumo

energético superior. A menor parcela de consumo atribuída ao compressor na semana de maior produção está relacionada com a alteração do regime de funcionamento nesta semana. Ao contrário da maioria dos equipamentos, o tempo de funcionamento do compressor não é directamente proporcional ao tempo de fabrico, assim, enquanto na semana de maior produção, a maioria das máquinas esteve ligada durante mais do dobro do seu tempo de funcionamento médio, o compressor apenas alargou o seu horário de funcionamento em cerca de metade, derivado do facto de ter sido, excepcionalmente, introduzido um terceiro turno. Assim, conclui-se que, para as mesmas condições operatórias, a única máquina que impede o consumo relativo por equipamento de se manter constante, é o compressor.

Através da comparação entre os métodos de cálculo da energia consumida utilizados, recorrendo à potência activa e à potência nominal, constata-se que a principal diferença na distribuição obtida reside no decréscimo da influência dos moinhos no consumo total quando o cálculo contabiliza a potência activa. Esta discrepância é explicada pelo facto dos moinhos serem os equipamentos de maior potência nominal instalados na unidade industrial, perfazendo um total de 220 kW, embora funcionem em vazio durante uma fracção substancial do tempo em que se encontram ligados, utilizando uma potência bastante inferior à nominal. Foi a percepção de que grande parte do período de funcionamento dos moinhos de martelos não acrescentava valor ao produto final que levou ao estudo de um dos cenários de melhoria, a instalação de VEV's, com o propósito de reduzir a velocidade de rotação dos moinhos de martelos, em vazio, e consequentemente o seu consumo energético.

Para efeitos de validação do modelo de distribuição energética elaborado, considerou-se que o procedimento mais coerente passaria pela comparação entre o valor da factura eléctrica referente à semana de 20 a 24 de Fevereiro de 2017 e o valor obtido com recurso à potência activa para o mesmo período. A escolha desta semana em prol da semana de maior produção (Março 2016) para efeitos de validação tem por base o facto das medições de intensidade de corrente terem sido efectuadas no primeiro mês em que decorreu este estágio, Março de 2017 e como tal, os valores obtidos deverão estar mais próximos da realidade da semana tida como referência. Para além disso, durante o mês de Março de 2016, o sistema de ventilação dos moinhos não esteve a funcionar devidamente, o que aumentou a energia despendia face ao valor esperado.

Consultando a factura da electricidade, verifica-se que, na semana em estudo, o total da energia eléctrica consumida na fábrica foi de 10718 kWh. Segundo o modelo elaborado, o consumo semanal seria de 10713 kWh, como se observa nas tabelas de distribuição de consumos relativos e absolutos, presente em anexo, pelo que existe um erro, por defeito, de 0,05%, considerando-se que o modelo desenvolvido representa bem a realidade do consumo energético da empresa.

O erro existente poderá ter as seguintes causas principais: a margem de erro associada ao multímetro utilizado (+/- 1,5%) (Fluke 179 True RMS Digital Multimeter); a incerteza relativa à percentagem de tempo em carga de cada equipamento, já que, como explicado anteriormente, o método que se utilizou para estimar a fracção de tempo em carga consistiu na obtenção de um valor médio por tipologia de equipamento, embora, dentro de cada tipologia, equipamentos distintos possam apresentar comportamentos ligeiramente diferentes; a não inclusão da variabilidade no comportamento energético de cada equipamento causada pela fórmula S800; e ainda o facto da análise ter sido realizada apenas para os motores eléctricos trifásicos da fabrica, enquanto a factura consultada também inclui a electricidade despendida na iluminação e equipamentos eléctricos.

Analisou-se ainda a **sensibilidade do modelo desenvolvido à fracção de tempo de funcionamento em carga de cada equipamento**. Para esse efeito, atribuíram-se diversos valores ao mesmo e analisou-se o impacte desta alteração no consumo energético e no erro face à factura energética. Foram estudados 7 cenários diferentes:

- O cenário 1 contempla os valores obtidos na análise explicitada anteriormente;
- O cenário 2 em que os factores de carga resultam do quociente entre o tempo em carga e o tempo total médio de permanência de um ciclo na linha de produção (não contemplando a presença de vários ciclos em simultâneo na linha de fabrico);

- O cenário 3, no qual as fracções de carga resultam do quociente entre a estimativa do tempo semanal em carga de cada tipo de equipamento (extrapolação dos tempos médios obtidos por cronometragem, multiplicando-os pelo número de lotes produzidos nessa semana) e o tempo de funcionamento semanal (Fevereiro 2017) medido com recurso ao software de recolha de dados presente na fábrica;
- Os cenários 4 a 7 em que se seleccionaram valores entre 25% e 100% de fracção de tempo em carga para o conjunto dos equipamentos.

Apresentam-se, na Tabela 3.7, os factores de tempo em carga correspondentes a cada um dos cenários explicitados e na Tabela 3.8, os resultados desta análise.

Tabela 3.7 – Fracções de Tempo em Carga Utilizados na Análise de Sensibilidade

Tipologia de Equipamento	Fracção de Tempo em Carga						
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
Elevadores de Alcatruzes	52%	20%	55%	25%	50%	75%	100%
Transportadores *Redler*	51%	19%	57%	25%	50%	75%	100%
Ventiladores	54%	21%	57%	25%	50%	75%	100%
Blowers	13%	5%	18%	25%	50%	75%	100%
Moinhos	54%	21%	57%	25%	50%	75%	100%
Outros	53%	20%	54%	25%	50%	75%	100%
Misturadoras	40%	12%	61%	25%	50%	75%	100%
Compressor	63%	63%	63%	25%	50%	75%	100%

Tabela 3.8 – Análise de Sensibilidade ao Modelo de Distribuição Energética para a Semana de 20-24 de Fevereiro de 2016

Tipologia de Equipamento	$\sum_{[kWh]} E_v$	$\sum_{[kWh]} E_c$	Consumo Energético Estimado em Cada Cenário [kWh]						
			1	2	3	4	5	6	7
Elevadores de Alcatruzes	319	708	522	397	533	416	514	611	708
Transportadores *Redler*	823	1374	1103	930	1139	961	1099	1237	1374
Ventiladores	296	793	562	398	580	420	545	669	793
Blowers	774	1144	823	793	842	867	959	1052	1144
Moinhos	2406	6684	4699	3284	4849	3475	4545	5615	6684
Outros	363	486	428	388	429	393	424	455	486
Misturadoras	509	769	613	540	668	574	639	704	769
Compressor	1907	1995	1962	1962	1962	1929	1951	1973	1995
Total	7397	13954	**10713**	**8692**	**11001**	**9036**	**10675**	**12315**	**13954**
Erro	-	-	**-0,05%**	**23,3%**	**2,6%**	**18,6%**	**0,4%**	**13,0%**	**23,2%**

Pode concluir-se que o método utilizado inicialmente para estimar a fracção de tempo em carga de cada equipamento é o mais adequado uma vez que apresenta o erro relativo mais baixo (0,05%) e é o único que apresenta um erro por defeito, já que não foram contabilizados os poucos equipamentos de iluminação e aplicações electrónicas existentes. Verifica-se ainda que o modelo apresenta uma variação significativa com a alteração do factor de carga, já que nos cenários mais irrealistas, o erro atinge os 23%. Deste modo, um dos pressupostos tidos em conta na sugestão de cenários de melhoria, foi precisamente a necessidade de aumento das fracções de carga dos equipamentos em estudo.

A fase seguinte da caracterização energética da unidade fabril em estudo passou pelo **cálculo dos consumos específicos de cada operação**, de acordo com os dados recolhidos no período analisado. Para esse efeito, cruzaram-se os resultados obtidos na distribuição energética por tipologia de equipamento com os consumos energéticos e mássicos de 2016 de modo a estimar os consumos anuais e específicos, tanto em relação à totalidade da massa das rações produzidas como em relação à matéria efectivamente processada em cada operação/equipamento. Os consumos específicos obtidos por processo e por equipamento, são apresentados na Tabela 3.9 e na Tabela 3.10, respectivamente.

Tabela 3.9 - Consumos Específicos por Processo

	Energia Anual [kWh]	Output Mássico Anual [ton]	Consumo Específico - output mássico individual [kWh/ton]	Consumo Específico - output mássico global [kWh/ton]
Armazenamento a Granel MP	38028	71321	0,53	0,51
Doseamento	33870	74618	0,45	0,45
Separação	2762	71321	0,04	0,04
Moagem	473821	72137	6,57	6,35
Mistura	111444	74618	1,49	1,49
Armazenamento a Granel PF	33041	50550	0,65	0,44
Mistura e Expedição de Medicamentosas	9265	22362	0,41	0,12
Aquecimento Banha	56554	1021	55,39	0,76
Armazenamento em células metálicas ou Big Bags	16981	2449	6,93	0,23
Doseamento Medicados	0	64	0	0,00
Ar Comprimido	157490	0	-	2,11
Total	933256	74618	-	12,51

Tabela 3.10 - Consumos Específicos por Tipologia de Equipamento

	Energia Anual [kWh]	Output Mássico Anual [ton]	Consumo Específico - output mássico individual [kWh/ton]	Consumo Específico - output mássico global [kWh/ton]
Elevadores de Alcatruzes	41877	74618	0,56	0,56
Transportadores *Redler*	88530	74618	1,19	1,19
Ventiladores	45148	0	-	0,61
Outros	34169	74618	0,46	0,46
Blowers	66084	2449	26,98	0,89
Moinhos	377189	72137	5,23	5,05
Misturadoras	49234	74618	0,66	0,66
Compressor	157490	0	-	2,11
Total Electricidade	859721	74618	-	11,52
Caldeiras	56554	1021	55,39	0,76
Total Gás Natural	56554	1021	-	0,76
Empilhadores	16981	2449	6,93	0,23
Total Propano	16981	2449	-	0,23
Total Global	933256	78088	-	12,51

No que concerne ao consumo específico, relativo ao *output* mássico global, de cada operação e equipamento, os valores obtidos apenas realçam as conclusões obtidas anteriormente. Relativamente à energia despendida por unidade de massa processada, verifica-se que os equipamentos menos eficientes são as caldeiras, os sobrepressores (blowers), os empilhadores e os moinhos. Analisando estas ineficiências à luz do peso relativo que cada máquina tem na factura energética final da cooperativa, tendo em conta o custo unitário de cada fonte energética, conclui-se a influência das caldeiras e dos empilhadores é residual face às restantes, pelo que a realização de um estudo de soluções de melhoria destes equipamentos não teria um impacto relevante no paradigma energético desta unidade industrial. Pelo contrário, a detecção de ineficiências nos moinhos de martelos e sobrepressores, contribuiu para a selecção dos cenários de melhoria a estudar nas secções 3.2.1 e 3.2.2.

Para finalizar a caracterização energética da unidade industrial em análise, recorreu-se à plataforma de monitorização energética da EDP Distribuição, sendo possível obter a **curva de carga horária diária da fábrica**. O estudo do perfil de consumo horário foi abordado de duas formas distintas:

1) Análise de um dia típico;
2) Cálculo do consumo horário médio nos dias úteis de Fevereiro a Maio (em Fevereiro ocorreu a última modificação na linha de produção).

Analisando o consumo energético diário, concluiu-se que embora exista claramente um perfil típico de consumo diário que evita a produção nas “horas de ponta”, existem também algumas excepções a esta regra fruto de alterações súbitas no plano de produção. Apresenta-se, infra, a comparação entre a curva de carga horária média, e a respectiva curva num dia típico. As curvas de carga apresentadas na Figura 3.11 irão servir de base ao estudo de um dos cenários de melhoria abordados, a instalação de uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) de energia fotovoltaica, conforme apresentado na Secção 3.2.4.

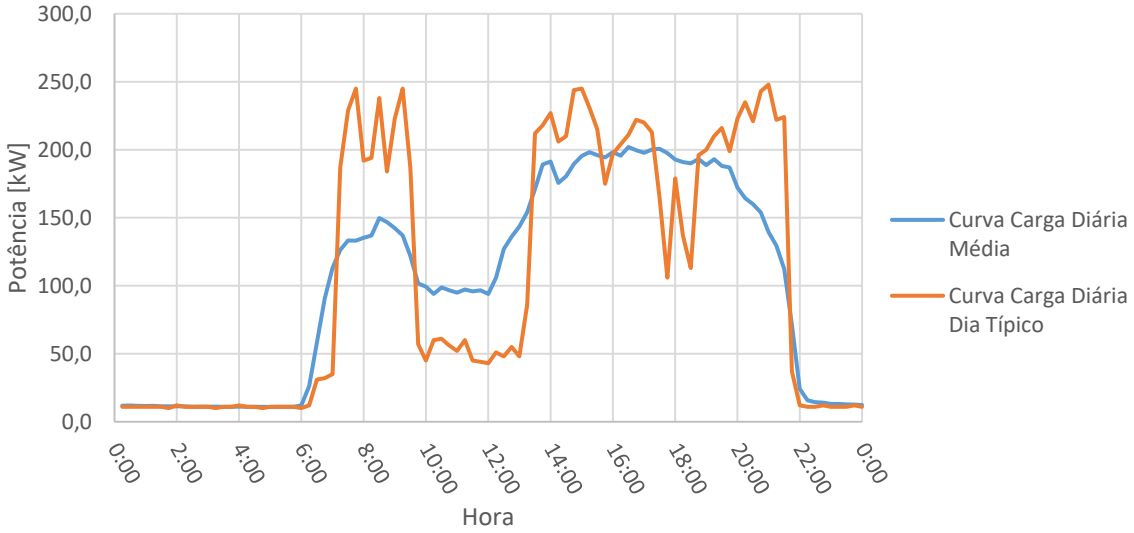


Figura 3.11 – Perfil de Carga Diário da Fábrica (A laranja apresenta-se a curva de carga de um dia típico e a azul o perfil de carga médio nos dias úteis)

Desde o início de 2016 que a Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L têm tomado medidas com o objectivo de melhorar a capacidade de produção e eficiência energética da instalação fabril, tendo-se associado à Galp e ao IST no âmbito do Programa Galp 20-20-20, no âmbito do qual se realizou este estágio. As medidas adoptadas até ao momento do início deste estágio têm passado sobretudo por melhorias no plano de produção de modo a evitar fabricar em "horas de ponta" (como se viu parágrafo anterior) e a agregação da produção de lotes da mesma receita de modo a reduzir o número de de *setups*. Os efeitos desta segunda medida, tendem a ser mais evidentes à medida que o tempo avança, já que é possível planear a produção com maior antecedência. Assim, no mês de Abril foi atingido um máximo na capacidade de produção da fábrica estimado em 24 ton/h. Associados ao aumento da cadência de fabrico estão fracções de carga mais elevadas dos equipamentos, no caso particular dos moinhos de martelos, o maior consumidor de energia da linha de produção, a fracção de carga atingiu no mês de Abril os 63%. Na Tabela 3.11 apresentam-se os valores da cadência média de produção no primeiro semestre de 2017, estimados pela gestão da produção da fábrica.

Tabela 3.11 – Evolução da Cadência de Produção Média no Primeiro Semestre de 2017

Período	Cadência de Produção Média
Janeiro	20,4
Fevereiro	21,0 (20,5*)
Março	23,5
Abril	24,0
Maio	24,0
Junho	23,5

* Semana de Menor Produção (20-24 Fevereiro)

De modo a que os resultados obtidos no capítulo 4 possam ser indicadores fidedignos da margem de melhoria que as medidas de optimização energética terão a capacidade de gerar face à situação actual, os impactes irão ser calculados face à cadência de produção média dos meses após os quais, as alterações na gestão da produção se fizeram sentir (Março a Junho), ou seja, 23,8 ton/h e nas fracções de tempo em carga associadas a essa cadência, apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Fracções de Tempo em Carga por Tipologia de Equipamento Obtidas Para a Conjectura Actual

Tipologia de Equipamento	Fracção de Tempo em Carga
Elevadores de Alcatruzes	60%
Transportadores *Redler*	59%
Ventiladores	62%
Blowers	15%
Moinhos	62%
Outros	62%
Misturadoras	47%
Compressor	63%

.

Às fracções de tempo de funcionamento em carga apresentadas, corresponde a distribuição de consumo por equipamento apresentada na Figura 3.12.

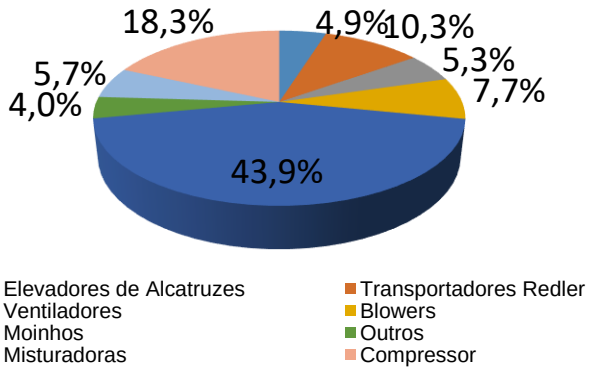


Figura 3.12 – Distribuição de Consumo por Tipologia de Equipamento Com Base na Potência Activa Considerando as Fracções de Tempo de Funcionamento em Carga Médias entre Março e Junho de 2016

Consultando-se as facturas da electricidade correspondentes aos meses mencionados e os respectivos registos de produção, verifica-se que, a unidade industrial apresenta os seguintes índices de desempenho energético:

Tabela 3.13 – Índices de Desempenho Energético Actuais

Índice de Desempenho	Valor	Unidades
Consumo Específico	10,22	kWh/ton
Custo Específico	1,20	€/ton
Custo Energético Unitário	0,1176	€/kWh

Para efeitos de cálculo de impactes de emissões de GEE, utilizou-se o valor de **Intensidade Carbónica** fornecido pela Endesa, 0,382 g CO_{2eq}/kWh.

3.2. Definição de medidas de melhoria de eficiência energética

No seguimento das oportunidades de melhoria identificadas ao longo da secção 193.1.2, optou-se pela análise aprofundada dos impactes energéticos, ambientais e económicos que a aplicação de um conjunto de medidas concretas teria na unidade fabril em estudo. Os cenários de melhoria investigados foram os apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Definição dos Cenários a Analisar

Cenário		Objectivo
A	Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos	Reduzir o desperdício energético que se verifica actualmente durante o funcionamento em vazio dos moinhos de martelos (maiores consumidores de energia nesta fábrica) e dos sobrepressores, que embora apresentem um peso relativo inferior no consumo da fábrica, apresentam a menor fracção de tempo em carga de toda a instalação industrial.
B	Instalação de VEV's nos Sobrepressores	
C	Substituição do Sistema de Doseamento de Milho	Aumentar a cadência de produção fabril, através da diminuição do tempo de ciclo da etapa mais demorada.
D	Instalação de Unidade de Produção de Autoconsumo de Energia Fotovoltaica	Alteração da origem de uma fracção significativa da energia primária consumida, recorrendo-se, para esse efeito, a uma fonte renovável, sustentável e de menor custo, a energia solar
E	Plano Para Eliminação dos Imprevistos Operacionais no Doseamento	Aumentar a cadência de produção fabril, através da diminuição dos desperdícios de tempo com origem operacional.

A metodologia utilizada no cálculo dos impactes das medidas expostas é apresentada nas secções que se seguem.

3.2.1. Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos

Como se conjecturou na secção 2 e se verificou na secção 3.1.2, os moinhos de martelos são, por uma larga margem, os maiores consumidores energéticos da unidade industrial em estudo. Concluiu-se ainda que uma fracção significativa da energia consumida não produz qualquer valor acrescentado, uma vez que é utilizada com o único propósito de manter os moinhos de martelos a uma rotação constante de 3000 rpm, nos períodos em que não é efectuado processamento de material. Deste modo, a redução da velocidade de rotação dos moinhos em vazio e consequente diminuição da energia consumida em vazio pelos moinhos, através da instalação de variadores electrónicos de velocidade (VEV's), afigura-se como uma enorme oportunidade de redução do consumo específico da instalação fabril, sem que o processo de fabrico sofra qualquer alteração.

Após instalação dos VEV's, a velocidade de funcionamento em vazio dos moinhos de martelos será um parâmetro crucial para a redução do seu desempenho. Esta deverá ser seleccionada com o objectivo de minimizar o consumo energético durante os períodos em que os moinhos operam em vazio. O valor a seleccionar depende sobretudo das características da carga imposta pela máquina à qual o motor está acoplado, logo, para seja possível quantifica-lo, é necessária uma análise dos mecanismos físicos envolvidos no processo de moagem.

A potência mecânica despendida no funcionamento destes equipamentos resulta do produto entre o binário e a velocidade angular, pelo que é necessário determinar o ponto que minimize este produto. Em rigor, este ponto de funcionamento varia entre diferentes instalações, estando dependente das condições operatórias. Assim, o único modo de o determinar de forma exacta passa por um processo iterativo, pós-instalação. No entanto, estimar-se-á um valor adequado para a nova velocidade de funcionamento em vazio e seu impacte na redução do consumo energético, de modo a ser possível estudar a viabilidade do investimento

Já que a velocidade será controlada pelo variador (através da variação da frequência da tensão de alimentação), resta a análise das forças envolvidas no processo. As principais forças aplicadas no rotor dos moinhos durante o seu funcionamento em vazio, em regime estacionário, são: as forças de atrito exercidas nas chumaceiras do veio do rotor; e a força de resistência aerodinâmica que atua nas secções transversais dos martelos. Uma vez que a secção transversal dos martelos apresenta reduzidas dimensões (6x140mm) e o interior dos moinhos se encontra em depressão devido à acção de ventiladores centrífugos, a força de resistência aerodinâmica é desprezável neste processo. Assim, a minimização da potência consumida pelos moinhos, em vazio, passará pela selecção da menor velocidade de funcionamento possível, desde que não se passe a operar num regime de lubrificação em que o coeficiente de atrito nas chumaceiras assuma valores elevados.

Na Figura 3.13 podemos observar que o atrito entre duas superfícies lubrificadas com movimento relativo entre si pode variar entre duas situações limite: o atrito sólido e o atrito hidrodinâmico. No primeiro caso, a acção do lubrificante é praticamente inexistente, havendo contacto entre as superfícies sólidas, enquanto no segundo caso as superfícies sólidas não apresentam nenhum ponto de contacto. Perto da situação de atrito sólido, tem-se a lubrificação limite, onde a pelicula de lubrificante se encontra reduzida a poucas moléculas de espessura.

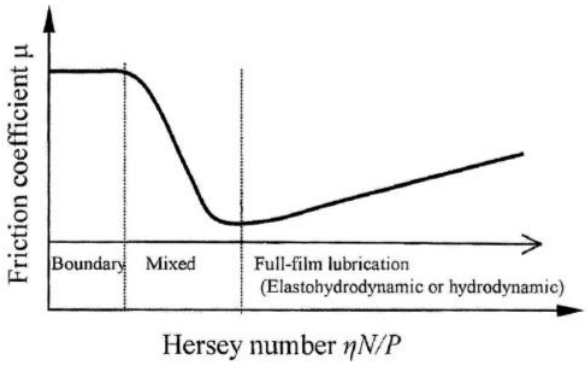


Figura 3.13 – Curva de Stribeck (24)

Nestas condições, o coeficiente de atrito toma valores elevados e é praticamente insensível à variação de velocidade relativa entre as superfícies. No caso de haver lubrificação hidrodinâmica, o coeficiente de atrito apresenta valores mais reduzidos e uma variação aproximadamente linear com a velocidade. Entre as situações apresentadas encontram-se as situações de regime misto, onde o coeficiente de atrito varia de forma mais pronunciada com a velocidade (25).

Como referido na secção 2, V.S.P Bitra et al estudaram a potência necessária ao funcionamento em vazio de um moinho de martelos, obtendo a seguinte função para a sua evolução com a velocidade de rotação dentro da gama de 1500 rpm a 3500 rpm:

$$P[kW] = 2{,}5965\times10^{-7}\times N^2[rpm] + 3{,}3968\times10^{-4}\times N[rpm] + 0{,}6549 \quad (3.5)$$

Onde P representa a potência (kW) e N simboliza a velocidade de rotação (rpm).

Uma vez que os valores de binário obtidos pelos autores, em regime estacionário, para esta gama de velocidades apresentavam uma variação linear bastante reduzida (entre 10,89 N.m

e 13,86 N.m), pode concluir-se que a curva apresentada se enquadra num regime de lubrificação hidrodinâmica nos rolamentos das chumaceiras dos moinhos, pelo que o extremo inferior da gama de velocidades estudada, 1500 rpm, deverá ser uma velocidade de funcionamento em vazio, adequada caso os resultados deste estudo possam ser extrapolados para os moinhos da instalação fabril em estudo. No entanto, caso se opte pela instalação dos variadores de velocidades, este *"**setpoint**"* deverá ser alvo de um processo iterativo, no sentido de garantir a minimização da energia consumida nas condições operatórias da instalação.

Dado que o estudo mencionado foi conduzido para um equipamento de diferentes dimensões e potência inferior aos que se pretende analisar, torna-se necessário verificar se a equação mencionada é representativa do comportamento dos moinhos de martelos presentes na fábrica da cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L. Dado que os moinhos, operam actualmente a velocidade constante, dispomos apenas de um ponto de funcionamento para efeitos de comparação com o regime descrito pela expressão apresentada. Para esse efeito, adimensionalizou-se a equação obtida empiricamente por V.S.P Bitra et al, colocando-a em termos da potência relativa e verificou-se se o ponto de funcionamento em vazio dos moinhos actuais estaria contido nessa mesma curva ou, pelo menos, apresentava um desvio diminuto face à mesma. Caso esta condição se verifique, assumir-se-á que esta evolução da potência com a velocidade de rotação é representativa das máquinas em análise, sendo possível estimar a redução de potência utilizada em vazio, conforme apresentado na equação (3.6), onde P representa a potência instantânea (kW), P_{nom} simboliza a potência nominal (kW) e N é a velocidade de rotação (rpm).

$$\frac{P}{P_{nom}} = \frac{2{,}5965\times10^{-7}\times N^2[rpm] + 3{,}3968\times10^{-4}\times N[rpm] + 0{,}6549}{18} \tag{3.6}$$

Sabendo que a potência mecânica média, em vazio, dos moinhos existentes na fábrica é de 24,9 kW (22,67% da sua potência nominal) e a sua velocidade de funcionamento, em regime estacionário, é de 3000 rpm, representa-se o seu ponto de funcionamento actual a cor-de-laranja sobre a curva empírica na Figura 3.14. Para o cálculo da potência mecânica utilizada em vazio, utilizou-se o valor médio da intensidade de corrente medida entre ciclos, 45 A, e os valores do rendimento eléctrico e $cos\theta$, presentes nas chapas dos motores, 0.93 e 0.86 respetivamente.

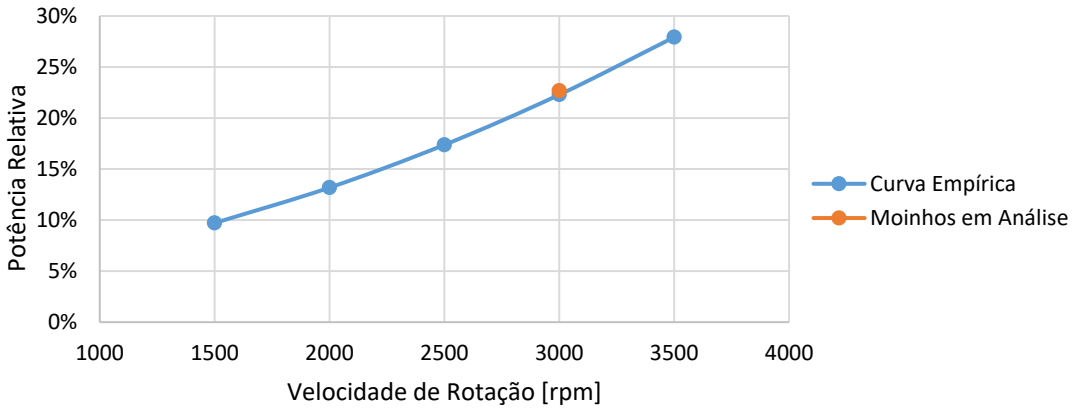


Figura 3.14 – Curva de Carga Típica de Moinhos de Martelos em Vazio e Ponto de Funcionamento Actual (Adaptado de (10))

Embora o valor da potência relativa em vazio previsto pela equação empírica, a uma velocidade de 3000 rpm, e a potência relativa medida, não sejam exactamente coincidentes, o erro relativo entre os dois valores é de apenas 1.7%, pelo que se adoptará esta curva como referência em termos de cálculo do impacte energético desta solução. Deste modo, recorrendo à equação (3.6), é possível estimar o consumo energético em vazio dos moinhos de martelos para a velocidade mínima de rotação imposta pelos VEV's.

O passo seguinte caracteriza-se pela determinação do diferencial de potência necessária ao funcionamento dos moinhos de martelos, em vazio ($\Delta P_{MMvazio}$[%]), decorrente da instalação

de VEV's. Para esse efeito recorre-se à equação (3.7), onde $P_{MMVEVvazio}$ [%] representa a potência mecânica consumida por estes esquipamentos em vazio após instalação dos VEV's e $P_{MMvazio}$[%] simboliza a potência mecânica necessária, actualmente, para o mesmo regime.

$$\Delta P_{MMvazio} = \left(1 - \frac{P_{MMVEVvazio}[\%]}{P_{MMvazio}[\%]}\right) \tag{3.7}$$

Como se indica na equação (3.8), multiplicando o valor obtido em (3.7), pela fracção energética consumida pelos moinhos em vazio (%), obtida na secção 3.1.2, obtém-se a redução no consumo total dos moinhos ($\Delta E_{MMtotal}$[%]).É ainda necessário ter em consideração o rendimento dos variadores a instalar, "η_{VEV}" (%).

$$\Delta E_{MMtotal}[\%] = \frac{E_{MMv} \times f_{MMv}}{E_{MMc} \times f_{MMc} + E_{MMv} \times f_{MMv}} \times \Delta P_{MMvazio}[\%] \times \eta_{VEV} \tag{3.8}$$

Finalmente, determina-se o impacte energético deste cenário no panorama global da unidade fabril, "ΔE_{total}[%]", através do produto entre o valor obtido para a redução do consumo dos moinhos de martelos, $\Delta E_{MMtotal}$[%], pela fracção de consumo dos mesmos face ao consumo global (%), calculada em 3.1.2, como está explícito na equação (3.9) onde todos os termos representam percentagens.

$$\Delta E_{total}[\%] = \Delta E_{MMtotal}[\%] \times \frac{E_{MM}}{E_{total}} \tag{3.9}$$

Após reunião com a empresa responsável pela automação, foi indicado que, segundo experiências anteriores em moinhos semelhantes, a frequência poderia ser reduzida até aos 25 Hz (o que, segundo a equação (3.6) corresponde a 1000 rpm), sem que o consumo energético aumente. Com base nesta informação, a análise de impactes presente na secção 4.1, contempla velocidades de rotação em vazio no intervalo entre 1000 e 1500 rpm.

Numa primeira fase, assumir-se-á, para efeitos de cálculo da poupança energética, que após instalação dos variadores de velocidade nos moinhos de martelos, estes passarão a operar a 1500 rpm sempre que não estiverem em carga, sendo que, segundo as equações Figura 3.6 e (3.7), esta redução de 50% na velocidade de rotação se traduzirá numa diminuição de 57,1% da potência em vazio, face ao valor actual, como se observa na Figura 3.15.

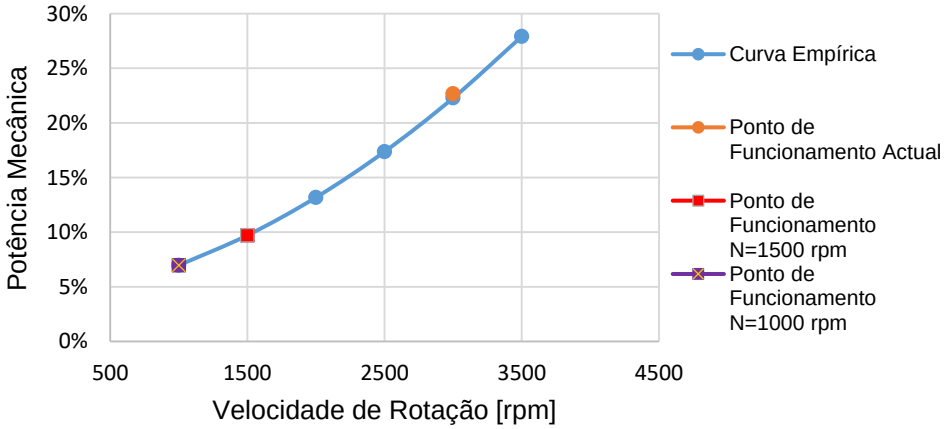


Figura 3.15 – Pontos de Funcionamento em Vazio dos Moinhos de Martelos Após Instalação de VEV's para N=1000 rpm e N=1500 rpm.

Nessa mesma reunião com a empresa responsável pela automação referiu-se que para além da redução do consumo energético proveniente da redução da velocidade de funcionamento dos moinhos em vazio, a instalação de variadores de velocidade contemplava ainda a possibilidade de uma redução significativa do consumo em carga, uma vez que, segundo experiencias anteriores, a redução da velocidade de moagem melhoraria a qualidade do produto final através do decréscimo da percentagem de finos, sendo esta redução de velocidade proporcional a uma redução do consumo energético.

O estudo levado a cabo por El Shal ,M.S et al em 2010 (11), confirma a melhoria da qualidade das rações produzidas a velocidades mais reduzidas, contudo, tal como referido secção 2, a cadência de produção varia proporcionalmente à velocidade dos martelos. Uma vez que o objectivo a que este estudo se propõe passa pela redução do consumo energético específico e os constrangimentos actuais da gestão da produção não permitem a redução da capacidade de produção, optou-se por não aprofundar a investigação desta hipótese.

3.2.2. **Instalação de VEV's nos Sobrepressores**

Na secção 3.1.2 concluiu-se que os sobrepressores (*blowers*), cuja função é o transporte de matérias-primas secundárias, tais como pré-misturas, para a moagem ou para a mistura, dependendo da granulometria das matérias-primas a transportar, são os equipamentos com menor fracção de tempo de funcionamento em carga. Uma vez que o único mecanismo de controlo de caudal existente é um sinal *on/off*, que leva a interrupções de funcionamento, caso o tempo entre transportes consecutivos exceda uma determinada temporização, algo que só ocorre caso exista alguma anomalia na produção que origine tempos de ciclo mais elevados que o normal, durante a vasta maioria do tempo de operação em vazio existe uma quantidade significativa de energia que é gasta apenas para transportar ar através das condutas até aos pontos de descarga das mesmas (ventiladores), sendo que o ar com pressões superiores à atmosférica que é produzido nestes períodos não tem qualquer utilidade, já que não existem matérias para transportar.

Tendo em conta esta situação, o segundo cenário de melhoria proposto foi a instalação de variadores de velocidade nos sobrepressores, de modo a que nos períodos de tempo entre transportes de matéria-prima se pudesse reduzir a velocidade de funcionamento destes equipamentos e consequentemente o seu consumo energético. Como é possível observar naFigura 2.10, a curva de carga característica de um equipamento que opere em regime de binário constante, após instalação de um VEV, contempla ainda uma redução do consumo energético em qualquer ponto de funcionamento em carga, para além da poupança em vazio.

Os dois sobrepressores presentes nesta unidade fabril e respectivos motores aos quais estão acoplados, são idênticos, contudo, durante processo de aferição da potência activa instantânea, apresentaram valores de intensidade de corrente, em carga e em vazio, destintos. Esta variação deve-se às diferentes condições operatórias que lhes estão associadas. No que diz respeito ao regime de funcionamento em vazio, no sobrepressor responsável pelo transporte de matérias-primas até à moagem (Bw 03), a potência consumida assume um valor médio de 5,8 kW. Por outro lado, no mesmo regime, a máquina responsável pelo transporte até à mistura (Bw 02) apresenta uma potência média de 4,9 kW. Esta discrepância deve-se à existência de uma válvula de três vias instalada imediatamente a jusante do Bw 02, que é activada quando deixa de existir material a transportar nas condutas, eliminando a vasta maioria das perdas de carga. Uma vez que o outro sobrepressor não possui um mecanismo deste género, durante os períodos de funcionamento em vazio, o ar é transportado ao longo das condutas até ser extraído pelo ventilador situado no final da mesma, tendo portanto de vencer as perdas de carga existentes até esse ponto. No que concerne ao regime de funcionamento em carga, existiu uma discrepância ainda mais evidente entre potências instantâneas medidas. O Bw 02 registou valores de 17,5 kW, enquanto no seu par se mediram apenas 10,5 kW. Esta diferença de consumos é inerente ao próprio processo de fabrico pois o Bw 02 é responsável por encaminhar as pré-misturas de granulometria mais fina, directamente, para a mistura, sendo que, actualmente, as fórmulas de rações em produção englobam uma quantidade de pré-misturas finas superior à de pré-misturas de granulometria superior, a encaminhar para a moagem pelo

Bw 03. Uma vez que o caudal mássico a transportar pelo Bw 02 é superior, naturalmente, a potência necessária também o será.

É importante realçar que a válvula de três vias referida foi instalada no decorrer deste estágio, durante o mês de Junho de 2017, pelo que o seu efeito não foi tido em consideração na caracterização energética (secção 3.1.2). Actualizando o valor da intensidade de corrente consumida em vazio pelo respectivo sobrepressor na folha de cálculo utilizada para a estimativa da distribuição energética por tipologia de equipamento, a fracção de consumo dos sobrepressores, calculada com base na potência activa, reduz-se de 7,7% para 5,2%. Esta redução deveu-se ainda à melhoria da cadência de produção, fruto de alterações no plano de produção, já que as fracções de funcionamento em vazio de equipamentos de elevada potência, como os moinhos, diminuíram, aumentando o valor absoluto da energia despendida pelos mesmos e consequentemente o seu peso relativo para a instalação, reduzido o peso relativo de equipamentos menos potentes, como é o caso dos sobrepressores.

O primeiro passo da metodologia utilizada na estimativa dos impactes desta medida consistiu na obtenção das equações das rectas presentes na Figura 2.10. A situação actual foi aproximada pela curva característica de um equipamento com movimento reciproco de pistões, já que apresenta características de funcionamento semelhantes ao mecanismo de pistões rotativos (três lóbulos) em análise (26). Para o caso actual e o cenário proposto foram obtidas as equações (3.10) e (3.11) respectivamente, onde P_{SP} representa a potência mecânica consumida no estado actual (%), P_{SPVEV} simboliza a potência mecânica necessária após instalação dos VEV's (%) e Q_i representa a percentagem da capacidade nominal a ser utilizada em cada uma das situações.

$$P_{SP}[\%] = 0{,}8 \times Q[\%] + 20 \tag{3.10}$$

$$P_{SPVEV}[\%] = 0{,}95 \times Q_{VEV}[\%] + 5 \tag{3.11}$$

Actualmente os sobrepressores operam a uma média de 57,3% e 22,7% da sua potência nominal em carga e em vazio, respectivamente. Substituindo estes valores na equação (3.10) conclui-se que o ponto de operação actual corresponde a cerca de 46,6% e 3,3% do caudal nominal, em cada um dos regimes. Recorrendo à equação (3.11) é possível obter os valores homólogos em termos de potência relativa que seria necessária caso se instalassem VEV's: 49,2% e 8,2%, ficando assim definidos os novos pontos de funcionamento em cada um dos regimes, apresentados na Figura 3.16.

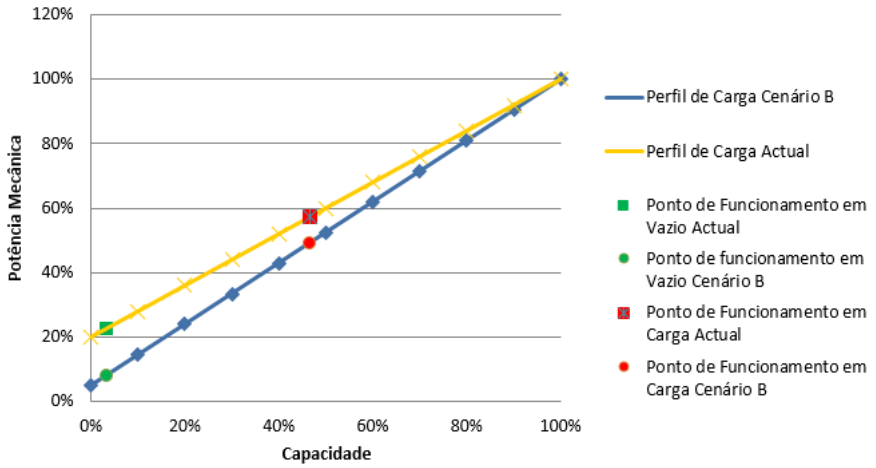


Figura 3.16 - Perfis de Carga e Pontos de Funcionamento dos Sobrepressores, nos Diferentes Regimes, Com e Sem VEV's.

Finalmente, calcula-se a redução de potência mecânica instantânea esperada em cada uma das situações ($\Delta P_{SPvazio}$ e $\Delta P_{SPcarga}$), com recurso às equações (3.12) e (3.13), onde se designaram as potência mecânicas calculadas anteriormente por P_{SPij}, em que i é igual a "VEV" quando se trata da potência consumida caso se implemente o cenário de melhoria B, sendo inexistente quando se trata da situação actual e j corresponde ao regime de funcionamento ("carga" ou "vazio"). Todas as variáveis surgem sob a forma percentual.

$$\Delta P_{SPvazio}[\%] = 1 - \frac{P_{SPVEVvazio}[\%]}{P_{SPvazio}[\%]} \tag{3.12}$$

$$\Delta P_{SPc\,\arg a}[\%] = 1 - \frac{P_{SPVEVc\,\arg a}[\%]}{P_{SPc\,\arg a}[\%]} \tag{3.13}$$

O passo seguinte consiste na obtenção da redução energética percentual dos sobrepressores face à situação actual, em regime de carga e vazio ($\Delta E_{SPcarga}$ [%] e $\Delta E_{SPvazio}$ [%], respectivamente) para esse fim multiplicam-se as reduções percentuais obtidas em através das equações (3.12) e (3.13) ($\Delta P_{SPvazio}$[%] e $\Delta P_{SPcarga}$[%]) pelas fracções de consumo energético em carga e em vazio (%) destes equipamentos, calculadas através da metodologia exposta em 3.1.2. Surgem assim as equações (3.14) e (3.15).

$$\Delta E_{SPvazio}[\%] = \Delta P_{SPvazio}[\%] \times \frac{E_{SPv} \times f_{SPv}}{E_{SPc} \times f_{SPc} + E_{SPv} \times f_{SPv}} \tag{3.14}$$

$$\Delta E_{SPc\,\arg a}[\%] = \Delta P_{SPc\,\arg a}[\%] \times \frac{E_{SPc} \times f_{SPc}}{E_{SPc} \times f_{SPc} + E_{SPv} \times f_{SPv}} \tag{3.15}$$

A redução total do consumo de energia dos sobrepressores, $E_{SPtotal}$[%], é então dada pelo produto da soma das reduções energéticas calculadas em (3.14) e (3.15) (%) e o rendimento dos variadores de velocidade, η_{VEV} (%), originando a equação (3.16).

$$\Delta E_{SPtotal}[\%] = (\Delta E_{SPvazio}[\%] + \Delta E_{SPc\,\arg a}[\%]) \times \eta_{VEV} \tag{3.16}$$

Finalmente, calcula-se o impacte desta medida no consumo global da instalação fabril, adaptando-se a equação (3.9) para os sobrepressores, o que corresponde a alterar os índices "MM – Moinho de Martelos" para "SP – Sobrepressores", originando a Equação (3.17).

$$\Delta E_{total}[\%] = \Delta E_{SPtotal}[\%] \times \frac{E_{SP}}{E_{total}} \tag{3.17}$$

3.2.3. Substituição do Sistema de Doseamento do Milho

Um dos desafios actuais da Cooperativa Porto Alto – rações para animais, C.R.L, passa pelo aumento da cadência de produção. Neste estudo, irão ser analisadastrês alternativas diferentes com o propósito de atingir essa meta e, simultaneamente, indo de encontro aos objectivos do programa Galp 20-20-20 de diminuir o consumo energético específico desta unidade fabril.

A análise dos tempos produtivos de cada processo e equipamento, apresentada em 3.1.2 foi fulcral para a determinação do processo que, actualmente, limita a cadência de produção, o doseamento. Ainda na mesma secção, ficou explícito que existe uma diferença de 21 segundos entre as duas operações com maior tempo de ciclo, o doseamento e a moagem. Neste capítulo pretende-se encontrar uma solução que permita anular essa discrepância, melhorando o balanceamento da linha de produção e consequentemente diminuindo o tempo de ciclo. Dada a cultura de melhoria contínua que vigora na organização, seria conveniente obter uma diminuição superior aos 21 segundos, de modo a possibilitar que, num futuro próximo se melhorassem os novos processos limitantes da cadência produtiva, sem que o doseamento voltasse a ser a operação condicionante.

Tal como mencionado na secção 21.1, a operação de doseamento pode ser dividida em duas fases: o transporte até à balança; e a pesagem. De acordo com o estudo dos tempos efectuado, o transporte até à balança é bastante mais demorado do que a pesagem pelo que será essa a etapa a analisar detalhadamente. Consultando a lista de matérias-primas presentes em cada fórmula produzida, constata-se que o milho é o ingrediente presente em maior quantidade pelo que, naturalmente, o seu transporte até à balança será o mais demorado. Desta forma, realizaram-se então 10 cronometragens de modo a quantificar o tempo médio de transporte do milho entre os silos onde é armazenado e a balança. Os resultados destas medições são apresentados na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Tempos de Doseamento do Milho

Fórmula Produzida	Tempo médio [s]	Desvio Padrão [s]
S 810	53	0
S 810	60	7
S 810	53	0
S 832	46	7
S 832	50	3
S 829	55	2
S 829	55	2
S 801	53	0
S 820	54	1
S 820	53	0

Deste conjunto de medições resulta um tempo médio de 55 segundos com um desvio padrão de 2 segundos. Recorrendo à equação 3.2, conclui-se que o número mínimo de cronometragens que garante um nível de confiança de 95,5% (Z=2) e um erro relativo de 5% (p=0,05) é de apenas três medições, pelo que as 10 cronometragens efectuadas são suficientes.

Tendo obtido o tempo médio de doseamento do milho actual, o objectivo passa então pelo dimensionamento de um novo sistema de doseamento desta matéria-prima que permita a diminuição de, pelo menos, 21 segundos, face ao mecanismo actual. Para além desta ser a matéria cujo doseamento é mais demorado, o sistema de doseamento actual (Figura 3.17) apresenta várias ineficiências, entre as quais se destacam as seguintes:

- Devido à distância actual entre os silos de armazenamento e a balança, são necessários 6 transportadores para o doseamento de apenas uma matéria-prima;
- Trata-se do mecanismo de doseamento com a tecnologia mais antiga da fábrica, não tendo sofrido alterações desde que a mesma entrou em funcionamento. São

os únicos transportadores de doseamento de matérias-primas principais sem variação de velocidade;

- Dois dos transportadores de parafuso utilizados apresentam inclinações de 45º, o que origina perdas de eficiência de transporte da ordem dos 64% devido ao efeito do deslizamento de matéria por gravidade (16).

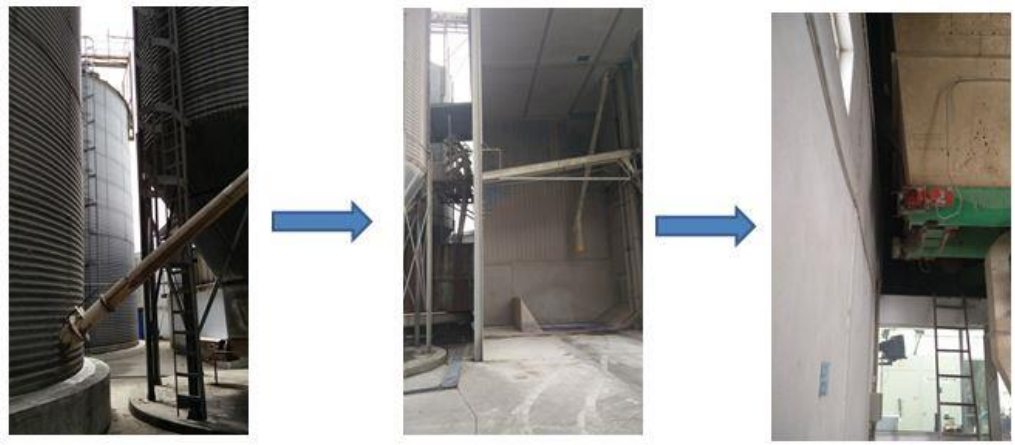


Figura 3.17 - Sistema de Doseamento de Milho Actual

O estudo de soluções alternativas para este processo passa então pela escolha de uma disposição mais eficiente dos mecanismos de transporte e pelo dimensionamento dos transportadores de modo a que tenham capacidade suficiente para fornecer o caudal de milho necessário para o cumprimento dos novos requisitos de projecto. O caudal mássico objectivo é calculado, conservativamente, pelo quociente entre a massa de milho máxima presente nas fórmulas actualmente em produção (kg) e o tempo objectivo de doseamento do milho em segundos. Multiplicando-se o caudal mássico (kg/s) pelo inverso da massa específica do milho (kg/m^3), obtém-se o caudal volúmico (equação (3.18)).

$$Q_{objectivo}\left[\frac{m^3}{s}\right] = \frac{m_{\max}[kg]}{t_{objectivo}[s]} \times \frac{1}{\rho_{milho}\left[\frac{kg}{m^3}\right]} \tag{3.18}$$

Para que seja possível calcular o caudal objectivo através da equação acima exposta, torna-se necessário definir o tempo objectivo. Tendo em consideração que o objectivo proposto é a eliminação da diferença existente entre o processo mais demorado (doseamento) e o segundo processo com maior tempo de execução (moagem), de modo a que o doseamento deixe de ser a operação limitante do tempo de ciclo, alterando apenas o mecanismo de doseamento do milho, basta que ocorra uma redução de 21 segundos face ao tempo médio actual. Contudo, caso o novo sistema seja dimensionado para esta redução, a próxima alteração que a cooperativa efectuar no sentido de aumentar novamente a cadência de produção, envolverá, obrigatoriamente, uma nova melhoria do sistema de doseamento. Por este motivo, optou-se por uma redução do tempo de doseamento do milho que seja suficiente para que o doseamento e a expedição (2º processo mais rápido) fiquem ao mesmo nível, havendo assim margem de melhoria nos processos intermédios antes que volta a ser necessário alterar o doseamento. Não se tomou como referência o tempo de mistura (o mais rápido actualmente) pois a diferença entre os tempos de doseamento do milho e o tempo de mistura, é de 73 segundos, sendo superior ao tempo total médio de doseamento do milho, 55 segundos. Uma vez que na secção 3.1.2 se concluiu que existem 31 segundos de diferença entre o tempo de doseamento e o tempo de transporte para os silos de expedição, o tempo objectivo é calculado do seguinte modo:

$$t_{objectivo} = 55 - 31 = 24s \tag{3.19}$$

Para o cálculo do caudal utilizou-se o valor médio da massa específica do milho, calculado com base nos relatórios fornecidos pelo laboratório da fábrica, 780 [kg/m^3] e o valor máximo da massa de milho presente, por ciclo, nas fórmulas actuais, 990 [kg].

Como mencionado na secção 2, os mecanismos tipicamente utilizados para o doseamento de matérias-primas são os transportadores *redler* e os transportadores de parafuso. Em seguida, expõe-se os métodos utilizados no dimensionamento de cada uma destas tipologias de equipamento.

Para o dimensionamento dos **transportadores de parafuso**, utilizou-se o método descrito no manual de dimensionamento disponibilizado por um fornecedor americano (16). Todas as tabelas e gráficos utilizados estão presentes em anexo, na secção 7 (Anexo F). A primeira etapa desta metodologia passa pela selecção do passo da hélice em função do diâmetro. Tipicamente, para aplicações horizontais ou com inclinações até 5º utilizam-se passos com o mesmo valor do diâmetro da hélice na maioria da extensão do transportador, e passos crescentes numa extensão inicial de comprimento reduzido, junto ao silo de abastecimento, já que nos instantes iniciais de funcionamento é necessário vencer as forças de inércia, o que exige menos potência no caso do passo inicial ser menor, uma vez que a massa a transportar por revolução também o será (16). Uma vez que a um passo mais reduzido corresponde um menor caudal a transportar por revolução, para passos menores que o diâmetro, multiplica-se o caudal objectivo (m^3/s) por um factor de capacidade (CF) maior que um, procedendo-se de forma oposta em caso de passos maiores que o diâmetro (equação (3.20)) .Os valores do factor de capacidade para diferentes passos podem ser consultados na tabela F.i, presente em anexo.

$$Q_{projecto}\left[\frac{m^3}{s}\right] = Q_{objectivo}\left[\frac{m^3}{s}\right] \times CF \tag{3.20}$$

De seguida compara-se o valor obtido para o caudal de projecto com os valores de referência presentes na ii F.ii (Anexo F) (em ft/m^3), seleccionando-se o diâmetro de hélice correspondente ao valor de caudal máximo imediatamente superior a "$Q_{projecto}$". Para a consulta desta tabela é ainda necessário indicar qual a área útil de transporte adequada ao material a transportar, esta informação está indicada na iii F.iii (Anexo F) para diversas matérias-primas e é sempre igual ou inferior a 45%. Para além do diâmetro de projecto e o caudal de transporte à velocidade de rotação máxima, a Tabela F.ii (Anexo F) dá-nos ainda indicação do valor dessa mesma velocidade de rotação e ainda o caudal correspondente a uma velocidade de rotação de 1 rpm.

A velocidade de rotação a que o transportador de parafuso irá operar, "$S_{projecto}$[rpm]", é então determinada através do quociente entre o caudal de projecto, "$Q_{projecto}$" (ft/m^3), e o caudal correspondente a 1 rpm, "Q_{1rpm}" (ft/m^3), como demonstrado na equação (3.21).

$$S_{projeto}[rpm] = \frac{Q_{projeto}\left[\frac{ft}{m^3}\right]}{Q_{1rpm}\left[\frac{ft}{m^3}\right]} \tag{3.21}$$

Finalmente, procede-se ao cálculo da potência eléctrica necessária, sabendo que, como foi referido em 2, as principais forças a vencer são as forças de atrito, tanto entre o material a transportar e o próprio transportador como nos mecanismos de transmissão e apoios dos respectivos veios (fracção mais reduzida). Para efeitos de cálculo recorre-se às equações empíricas (3.22) a (3.24), em unidades USCS (United States Customary System), em que FHP corresponde à potência necessária para vencer as forças de atrito nos rolamentos (em hp), MHP representa a potência exigida para ultrapassar as forças de atrito entre o material e a superfície do transportador (em hp), DF corresponde ao factor de diâmetro presente na iv F.iv (Anexo F), HBF é o factor associado ao tipo de rolamentos a utilizar e se encontra na v1F.v (Anexo F), "L" corresponde ao comprimento do transportador (ft), CP é o caudal mássico (lbs/hora), MF corresponde ao coeficiente de atrito dinâmico entre o material a transportar e a superfície do transportador, e_T é a eficiência do sistema de transmissão (%), FI simboliza o factor de

inclinação a consultar na Figura F.vi (Anexo F), e TSHP representa o total da potência necessária (hp).

$$FHP[hp] = \frac{DF \times HBF \times L[\,ft\,] \times S[rpm]}{1000000} \tag{3.22}$$

$$MHP[hp] = \frac{CP\left[\frac{lbs}{h}\right] \times MF \times L[\,ft\,]}{1000000} \tag{3.23}$$

$$TSHP[hp] = \frac{FHP[hp] + MHP[hp]}{e_T} \times FI \tag{3.24}$$

Caso a potência necessária para vencer o atrito entre a matéria-prima e a superfície (MHP) seja inferior a 5 hp, o valor obtido deve ainda ser corrigido com recurso à vii F.vii (Anexo F), de modo a prevenir potenciais sobrecargas.

Para efeitos de cálculo da potência eléctrica consumida, em carga e em vazio, "P_e" (hp) e "P_{evazio}" (hp) respectivamente, em condições normais de funcionamento, é necessário ter em conta o rendimento do motor eléctrico, "η_e" (%) (Equações (3.25) e (3.26)). No manual de dimensionamento utilizado (16) é ainda indicado que deve haver um ajustamento da potência nominal a instalar de modo a precaver situações esporádicas em que a área transversal do transportador fique totalmente preenchida com material (*upset conditions*), o que pode ocorrer, por exemplo no início do funcionamento destes equipamentos, já que é frequente a matéria-prima presente nos silos de armazenamento ser encaminhada directamente, por gravidade, para o abastecimento dos transportadores de parafuso. Esta situação é agravada no caso de existir inclinação apreciável, uma vez que a matéria-prima que tenha ficado retida no interior após a última utilização irá ter tendência para descer, acumulando-se na base do equipamento. Uma vez que as potências calculadas se têm em conta um volume útil de 45%, este efeito é quantificado através da multiplicação do valor obtido por um coeficiente de segurança, "n_{upset}" (%), de 2,22 de modo a garantir que não existem encravamentos e consequentes paragens da linha de produção. Assim, a potência nominal do motor, "P_n" em hp, é dada pela equação (3.27).

$$P_e[hp] = \frac{TSHP[hp]}{\eta_e} \tag{3.25}$$

$$P_{evazio}[hp] = \frac{FHP[hp]}{\eta_e} \tag{3.26}$$

$$P_n[hp] = P_e[hp] \times n_{upset} \tag{3.27}$$

Como se referiu na secção 2, **os transportadores *redler*** são mecanismos mais simples, de movimento linear. A aferição da potência necessária ao funcionamento destes equipamentos pode facilmente ser aproximada pela análise dos mecanismos físicos envolvidos. Considerando o funcionamento dos equipamentos a velocidade constante, isto é, em regime permanente, as componentes da potência necessária ao funcionamento serão exactamente as mesmas que se consideraram na análise dos transportadores de parafuso. Sabendo que a força de atrito é calculada através do produto da massa, aceleração gravítica e coeficiente de atrito que a potência mecânica resulta da multiplicação entre a força e a velocidade, a potência mecânica utilizada, será determinada com recurso à equação (3.28), em que m_{MT} e μ_{MT} representam a massa de material a transportar correspondente ao volume útil máximo (kg) e o coeficiente de atrito cinético entre este material e o transportador, respectivamente, m_{CP} e μ_{CP} simbolizam a massa da corrente do transportador incluindo os arrastadores acoplados (kg) e o coeficiente de

atrito cinético entre a corrente e a polia, respectivamente, g é a aceleração gravítica (m/s^2), v é a velocidade nominal do transportador (m/s) e η_m é o valor do rendimento mecânico (%).

$$P_m[W] = \frac{(m_{MT}[kg]\mu_{MT} + m_{CP}[kg]\mu_{CP}) \times g\left[\frac{m}{s^2}\right] \times v\left[\frac{m}{s}\right]}{\eta_m} \quad (3.28)$$

Uma vez que a velocidade nominal é igual ao quociente entre o caudal de projecto (m^3/s) e a área útil (m^2) e que a potência eléctrica a fornecer resulta do quociente entre a potência mecânica e o rendimento eléctrico, η_e (%), esta potência calcula-se de acordo com a equação (3.29).

$$P_e[W] = \frac{(m_{MT}[kg]\mu_{MT} + m_{CP}[kg]\mu_{CP})}{\eta_m \times \eta_e} \times g\left[\frac{m}{s^2}\right] \times \frac{Q_{objectivo}\left[\frac{m^3}{s}\right]}{A_{útil}\left[m^2\right]} \quad (3.29)$$

A massa de material a transportar correspondente ao volume útil máximo é obtida através do produto entre o volume útil (m^3) e a massa específica do material (kg/m^3) pelo que a equação (3.29)(3.30) toma a seguinte forma:

$$P_e[W] = \frac{(V_{útil}[m^3]\rho_{MT}\left[\frac{kg}{m^3}\right]\mu_{MT} + m_{CP}[kg]\mu_{CP})}{\eta_m \times \eta_e} \times g\left[\frac{m}{s^2}\right] \times \frac{Q_{objectivo}\left[\frac{m^3}{s}\right]}{A_{útil}\left[m^2\right]} \quad (3.30)$$

Para a determinação da potência consumida em vazio basta retirar da equação (3.30)(3.31), os termos correspondentes ao atrito entre o material a transportar e a superfície, obtendo-se:

$$P_{evazio}[W] = \frac{m_{CP}[kg] \times \mu_{CP}}{\eta_m \times \eta_e} \times g\left[\frac{m}{s^s}\right] \times \frac{Q_{objectivo}\left[\frac{m^3}{s}\right]}{A_{útil}[m^2]} \quad (3.31)$$

Tal como exposto para os transportadores de parafuso, o cálculo da potência nominal do motor a instalar deverá considerar a ocorrência de eventuais situações de sobrecarga causada pela ocupação do volume total do seu interior através de um coeficiente de segurança (n_{upset}), pelo que o cálculo da mesma se efectua com recurso à equação (3.27).

Ao aumento da cadência de produção está associado um tempo médio de ciclo mais reduzido e, consequentemente, fracções de tempo de funcionamento em carga mais elevadas, já que o tempo de funcionamento em carga dos restantes equipamentos se mantém. As fracções de tempo em carga resultantes da implementação deste cenário e consequente decréscimo do tempo de ciclo em 21 segundos são apresentadas na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Fracções de tempo em carga por tipologia de equipamento obtidas para a redução do tempo de ciclo em 21 segundos.

Tipologia de Equipamento	Fracção de Tempo em Carga
Elevadores de Alcatruzes	64%
Transportadores *Redler*	63%
Ventiladores	66%
Blowers	16%
Moinhos	66%
Outros	60%
Misturadoras	50%
Compressor	63%

.

Uma vez que esta medida tem como principal objectivo o aumento da produção, os impactes da mesma serão calculados tendo em conta o excedente de produção obtido face ao valor anual de 2016, considerando que o tempo de fabrico sem mantém. Dado que as fracções de tempo em carga dos equipamentos aumentam, a este cenário está associado um aumento do valor global de consumo energético, mesmo tendo em conta que o sistema de doseamento proposto utilizará potências inferiores às do sistema actual.

O método utilizado para estimar este aumento passou pela actualização das fracções de tempo em carga e substituição das potências consumidas, em carga e em vazio, pelos diversos equipamentos constituintes do sistema de doseamento equacionado na folha de cálculo do consumo semanal que deu origem às distribuições presentes na secção 3.1.2 e comparação do valor obtido com o valor correspondente à situação presente, através da equação (3.32), onde $\Delta E_{total}[\%]$ representa a variação no consumo energético devido à disposição em causa, $E_{prevista}$ é a energia consumida semanalmente prevista para a disposição em estudo (kWh) e E_{actual} é a energia semanal consumida actualmente (kWh).

$$\Delta E_{total}[\%] = \left(\frac{E_{prevista}}{E_{actual}} - 1 \right) \times 100 \tag{3.32}$$

O impacte deste novo sistema de doseamento no consumo específico da instalação, $\Delta c_e[\%]$, pode então ser determinado, tendo em conta a variação do consumo energético, $\Delta E_{total}[\%]$, e o incremento na produção, $\Delta Prod[\%]$, recorrendo à equação (3.33).

$$\Delta c_e[\%] = \frac{100\% + \Delta E_{total}[\%]}{100\% + \Delta \mathrm{Pr}\, od[\%]} - 100\% \tag{3.33}$$

A variação no consumo energético específico da unidade fabril ,$\Delta c_e[\%]$, é igual à variação do custo específico da mesma, ΔC_e (%), pelo que é possível estimar a variação de custos anuais com a electricidade, considerando o incremento na produção, ΔProd (ton), que existirá caso se opere durante o mesmo número de horas, como se verifica na equação (3.34) onde "$Prod_{prevista}$" é a produção anual prevista após implementação deste cenário (ton) e "Ce_{actual}" é o custo energético específico actual da instalação (€). Somando esta variação dos custos energéticos, "ΔCustosEnergéticos" (€), com a variação dos ganhos com a comercialização do excedente produzido, "GanhosProduçãoExtra" (€), considerando a produção extra ΔProd (ton) e uma margem de lucro por tonelada, "ml" (€/ton), obtém-se o ganho líquido anual desta medida que será utilizado para estimar o seu PRI (Equações (3.35) a (3.36)).

$$\Delta CustosEnergéticos = \mathrm{Pr}od_{prevista} \times Ce_{actual}(1 + \Delta c_e[\%]) - \mathrm{Pr}od_{actual} \times Ce_{actual} \tag{3.34}$$

$$Ganhos\,\mathrm{Pr}oduçãoExtra = \Delta \mathrm{Pr}od \times ml \tag{3.35}$$

$$GanhosLíquidos = Ganhos\,\mathrm{Pr}oduçãoExtra - \Delta CustosEnergéticos \tag{3.36}$$

Finalizada a exposição da metodologia utilizada na estimativa de impactes da alteração do sistema de doseamento do milho no consumo energético global da fábrica, apresentam-se na Tabela 3.17 as três disposições estudadas para esse efeito.

Tabela 3.17 – Sistematização das 3 Soluções Estudadas para a Substituição do Sistema de Doseamento Actual

Designação	Componentes a instalar	Comprimento [m]	Quantidade
1BPar	Raseira	-	4
	Transportador Redler	12	1
	Transportador de Parafuso	7	2
	Célula de Doseamento e Estrutura	-	2
1BRed	Raseira	-	4
	Transportador Redler	12	3
	Célula de Doseamento e Estrutura	-	2
2BRaz	Célula de Doseamento e Estrutura	-	3
	Raseira	-	9
	Transportador Redler	12	1
		6	1
		9	1
	Balança (Células de Carga e Depósitos)	-	1

As designações atribuídas a cada solução são abreviaturas dos mecanismos utilizados para o doseamento do milho:

- 1BPar – Mantém-se a existência de apenas uma balança para a pesagem de todas as matérias-primas e o doseamento do milho é realizado através de transportadores de parafuso.
- 1BRed - Mantém-se a existência de apenas uma balança para a pesagem de todas as matérias-primas e o doseamento do milho é realizado através de transportadores *redler*.
- 2Braz – Acrescenta-se uma balança ao sistema actual, ficando as duas balanças a operar em paralelo e o doseamento do milho é realizado com recurso a raseiras oscilantes (precisão de +/- 1 kg).

Como se observa na Tabela 3.17, as duas primeiras soluções apresentadas, “1BPar” e “1BRed” representam a mesma disposição, necessitando do mesmo número de cada tipo de componente, sendo que a única diferença reside na tipologia dos transportadores utilizados para o doseamento do milho, transportadores de parafuso e redler, respectivamente. Estas soluções consistem na instalação de duas novas células de doseamento com capacidade de aproximadamente 110 m^3(5,10x2,46x8,80), mais próximas da balança do que as instaladas actualmente e dispostas de modo a que só é necessário um transportador entre cada célula e a balança, sem qualquer inclinação. Estas disposições contemplam ainda a instalação de um novo transportador redler que recebe as matérias-primas directamente dos transportadores existentes T048 e T049 (vide Anexo A), alimentando as células a instalar. A disposição descrita é esquematizada na Figura 3.18.

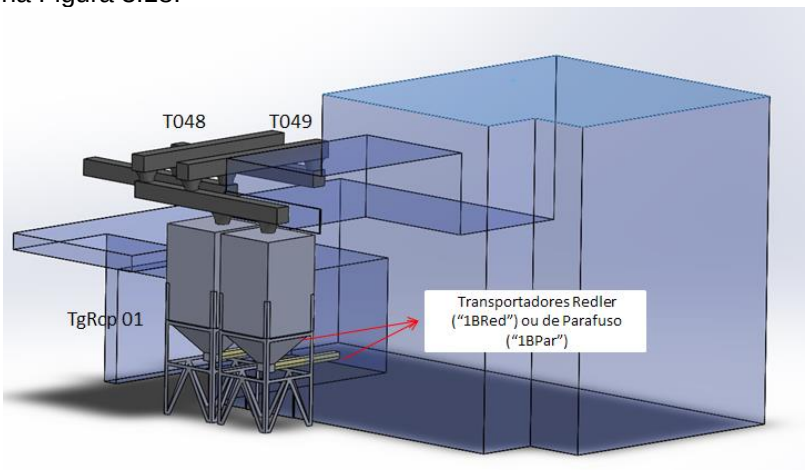


Figura 3.18 – Representação Esquemática das Disposições de Doseamento do Milho “1BPar” e “1BRed”

A terceira solução estudada envolve a instalação de mais uma balança, esta alteração possibilitará o transporte até à balança e pesagem de duas matérias-primas em simultâneo, em vez do processo sequencial que se verifica actualmente. Ao contrário das restantes, prevê a instalação de 3 células de doseamento em vez de duas, o que permitirá que para além do milho, duas das restantes matérias-primas principais, de preferência aquelas que apresentem o segundo e terceiro maior tempo de doseamento, sejam pesadas na nova balança, potenciando o seu uso. Uma vez que a balança a instalar se localiza sob duas das novas células de doseamento a utilizar, não são necessários transportadores, sendo a passagem das matérias-primas correspondentes das células para a balança, realizada por gravidade e controlada com recurso a raseiras oscilantes, o que leva praticamente à anulação do tempo de transporte do milho até à balança existente actualmente (27), e garante em simultâneo uma precisão da ordem de 1 kg. O transporte da terceira célula para a nova balança é efectuado através de um transportador redler. Para além do transportador necessário para a alimentação das células a instalar, esta solução requer ainda um terceiro equipamento do mesmo tipo para transportar a matéria-prima desde a nova balança até ao transportador redler que actualmente conduz a matéria-prima após pesagem, para a fase seguinte do processo.

Assim, facilmente se antevê que com a aplicação deste cenário de melhoria, o tempo de doseamento total seria reduzido a uma pequena fracção daquele que se verifica actualmente. No entanto, esta redução drástica não se iria reflectir no curto-prazo em aumentos da cadência de produção superiores aos que se obteriam com as outras soluções propostas, já que para melhorias no tempo de doseamento superiores a 21 segundos, a moagem passa a ser o processo limitante do tempo de ciclo. Dada a maior complexidade e necessidade de instalação de um número de componentes muito superior para a aplicação desta solução, naturalmente, o investimento inicial também deverá ser mais elevado. Deste modo, este cenário alternativo só pode ser encarado como um investimento viável, se englobado num conjunto de medidas de melhoria que leve a reduções significativas dos tempos de operação dos restantes processos à excepção da mistura, que devido ao investimento recente, apresenta um tempo de execução bastante mais reduzido que os demais. Uma representação esquemática da disposição descrita é apresentada na Figura 3.19.

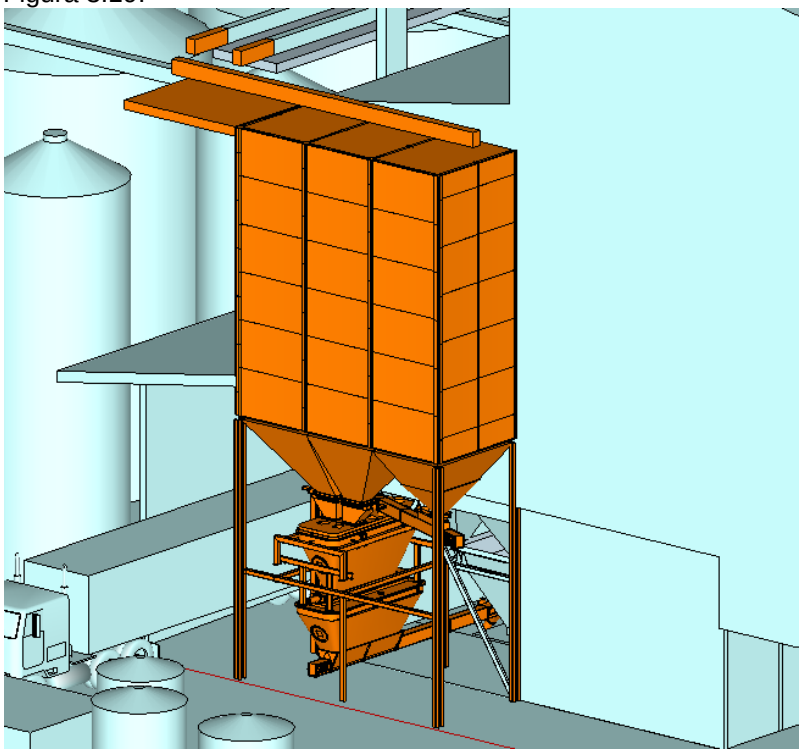


Figura 3.19 - Representação Esquemática da Disposição de Doseamento “2BRaz” (Imagem Fornecida pela Empresa “metalo-nicho SA.”).

3.2.4. Instalação de Unidade de Produção de Autoconsumo de Energia Fotovoltaica

A cooperativa Porto Alto – Rações Para Animais C.R.L está localizada numa propriedade que dispõe de uma área livre, disponível para a execução deste projecto com aproximadamente 13000 m^2 e as suas coordenadas geográficas são: 38,912; -8,849.

O primeiro passo da avaliação da viabilidade do investimento numa unidade de produção de autoconsumo (UPAC) baseada na conversão de energia solar através de tecnologia fotovoltaica passa pela avaliação da disponibilidade do recurso. A disponibilidade do recurso solar é quantificada recorrendo aos conceitos de irradiância e irradiação. Irradiância (G) define-se como sendo a potência solar incidente por unidade de área, sendo expressa em W/m^2. Por sua vez, a irradiação solar (H) é definida como a energia incidente por unidade de área, expressando-se em kWh/m^2. Assim, é possível calcular a irradiação solar ao longo de um dia através da integração da irradiância entre os instantes do nascer e pôr-do-sol.

De modo a definir a posição solar em função do dia do ano e da posição geográfica, utilizam-se três ângulos: o ângulo de declinação solar (δ), definido como o ângulo entre a linha Terra-Sol e o plano do Equador, que varia entre 23,45º no solstício de Verão e -23,45 no solstício de Inverno, o ângulo de altitude solar (α), definido entre a direcção dos raios solares e o plano horizontal e o ângulo de azimute solar (a_s) definido como o ângulo entre a linha Norte-Sul e a projecção dos raios solares no plano horizontal. Nas Figura 3.20 e 3.21 esquematizam-se os ângulos mencionados apresentam-se ainda os sentidos convencionados como positivos.

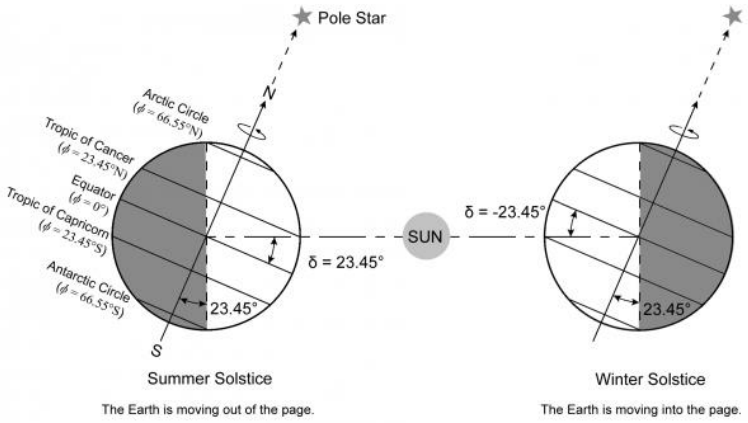


Figura 3.20 – Representação Esquemática do Ângulo de Declinação Solar (28)

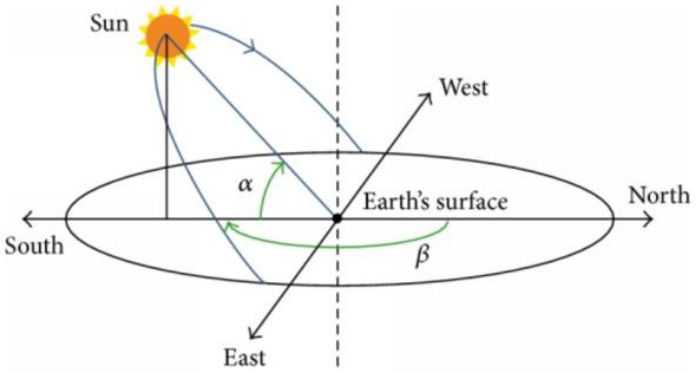


Figura 3.21 – Representação Esquemática dos Ângulos de Altitude e Azimute Solar (28)

Os ângulos mencionados são quantificados de acordo com seguintes relações trigonométricas tridimensionais representadas nas equações (3.37) a (3.39), onde "L" simboliza a latitude local, "N" é o dia do ano e "H" é o ângulo horário em graus, ou seja, o deslocamento angular do sol relativamente ao meridiano local devido à rotação da Terra, sendo igual a zero ao meio-dia solar e aumentando um total de 15º por cada hora seguinte (28).

$$\delta = 23{,}45 \times \text{sen} \times \left(\frac{360}{365} \times (284 + N) \right) \tag{3.37}$$

$$\alpha = sen^{-1} \times (\cos(L) \times \cos(\delta) \times \cos(H) + sen(L) \times sen(\delta)) \tag{3.38}$$

$$a_s = \frac{\cos(\delta) \times sen(H)}{\cos(\alpha)} \tag{3.39}$$

A variação do ângulo de altitude solar é apresentada na Figura 3.22 para a localização considerada, durante as horas de Sol. É ainda importante referir que o valor horário presente no eixo das abcissas da figura mencionada se refere à hora solar, sendo que existe uma relação directa entre esta e a hora legal, de acordo com o meridiano de referência de cada localização e tendo em consideração um factor de correcção para a excentricidade da órbita terrestre, assim como para a inclinação do seu eixo de rotação.

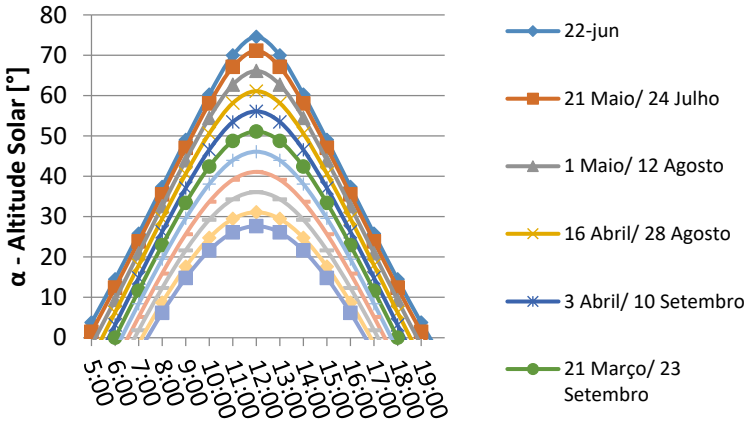


Figura 3.22 – Variação Horária do Ângulo de Altitude Solar ao Longo do Ano Calculada Para a Localização em Estudo.

Quando a radiação solar atravessa a atmosfera, existe uma interacção com as suas partículas e gases constituintes, o que leva à absorção de uma fracção e à difusão de outra parcela. A luz solar toma o percurso mais curto através da atmosfera ao meio dia solar, ou seja, quando a radiação solar é perpendicular à superfície terrestre. À medida que o ângulo de incidência solar diminui, o percurso a percorrer pela radiação aumenta, dando origem a uma fracção superior de radiação solar que sofre difusão e absorção, o que implica uma irradiância inferior. Este efeito é quantificado pelo factor de massa de ar (AM), que indica um múltiplo do percurso da radiação solar na atmosfera para um dado local, num determinado momento e pode ser definido como se expõe na equação (3.40), onde α representa o ângulo de altitude solar. Como média anual para a Europa, este factor toma o valor de 1,5 (29).

$$\text{AM} = \frac{1}{\text{sen}(\alpha)} \tag{3.40}$$

Após se ter estudado a disponibilidade do recurso solar na localização em análise, procedeu-se à determinação da orientação óptima dos painéis fotovoltaicos a instalar. Os painéis deverão estar orientados para Sul, pois é esta a orientação que maximiza a irradiação incidente durante o período de luz solar nos países pertencentes ao hemisfério Norte (30).

No que concerne à inclinação dos mesmos, existem autores que defendem a escolha da inclinação que maximiza a irradiação incidente nos meses de verão, já que esta é a estação do ano com maior período de exposição solar e menos tendência para a ocorrência de nuvens. O valor da inclinação óptima, segundo este critério, é obtido subtraindo 15º ao valor da latitude local, o que neste caso sugere uma inclinação de 24º (30). Por outro lado, o ângulo de inclinação dos painéis é um dos *inputs* dos softwares utilizados, actualmente, para o cálculo da irradiação local. Assim, optou-se por realizar este cálculo para um leque inclinações entre os 20º e os 40º de modo a perceber qual o ângulo óptimo para esta localização em específico.

É ainda necessário determinar a distância entre fileiras de modo a evitar o sombreamento entre painéis de fileiras destintas. Para este efeito, considera-se: a altura mínima do sol (β_{min}) em graus, a inclinação dos painéis (α) em graus, a altura dos painéis a instalar, "b" (m), o afastamento entre fileiras (d) em metros, a distância, vertical, vista em planta, entre fileiras (d_1) em metros e ainda a inclinação da superfície onde os painéis serão instalados (γ) em graus, no caso desta ter uma inclinação considerável, algo que não se aplica neste caso de estudo. Na Figura 3.23 é apresentada uma representação esquemática das dimensões descritas. Assim, a distância entre fileiras é dada pelas equações (3.41) e (3.42):

$$d_1 = \frac{b \times sen(\alpha)}{\tan(\beta_{min} - \gamma)}$$

$$d_1 = \frac{b \times sen(\alpha)}{\tan(\beta_{min} - \gamma)} \quad (3.41)$$

$$d = d_1 + b \times \cos(\beta_{min}) \quad (3.42)$$

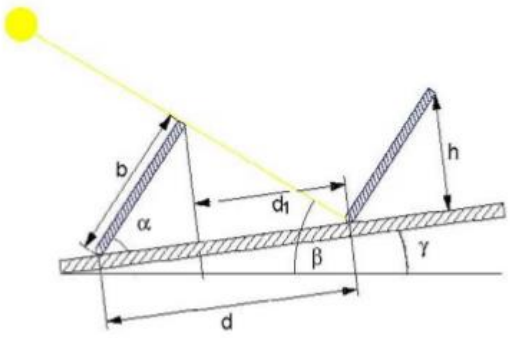


Figura 3.23 – Representação Esquemática da Distância Entre Fileiras Consecutivas (30)

Do leque de módulos fotovoltaicos propostos pela empresa responsável pela instalação de componentes eléctricos, optou-se pelo modelo Sunmodule Plus SW300 MONO, uma vez que os mesmos são os mais vantajosos no que concerne ao rendimento e à relação qualidade/preço. Estes módulos possuem 1,675 e 1,001 metros de comprimento (b) e largura, respectivamente.

Os dados referentes à irradiação solar, ao longo do ano, utilizados para efeitos de cálculo energético neste estudo foram obtidos com recurso ao software Meteonorm 7.2.1, que contém uma base de dados recolhidos entre 1991 e 2010 em diversas localizações por todo o globo e estão presentes Tabela 3.18. Utilizando os dados da localização geográfica presente na base de dados, mais próxima da considerada, foi feita uma interpolação de modo a estimar os valores da irradiação incidente numa superfície horizontal e inclinada, em 2018 na propriedade da Porto Alto Rações.

Tabela 3.18 – Irradiação Solar Mensal Calculada com Recurso ao Software Meteonorm 7.2.1 Para a Localização em Estudo

Mês	Irradiação Incidente Superfície Horizontal [kWh/m^2]	Irradiação Incidente Superfície Inclinada (θ=30º) [kWh/m^2]
Jan	71	117
Fev	88	125
Mar	136	168
Abr	171	186
Mai	212	209
Jun	227	213
Jul	237	227
Ago	213	223
Set	157	187
Out	113	152
Nov	73	109
Dez	60	100
Total	**1755**	**2015**

É ainda necessário ter em conta que entre o ponto onde se localizam os painéis solares e o ponto de entrega de electricidade à rede, existem diversas perdas que contribuem para a diferença entre a electricidade produzida e a energia eléctrica útil, diminuindo o rendimento global do sistema. Nos parágrafos seguintes descrevem-se e quantificam-se as perdas de qualidade dos módulos, as perdas devidas a variações de irradiância e temperatura, as perdas de compatibilidade e ainda as perdas alocadas aos materiais, nomeadamente, as perdas ohmicas.

A eficiência dos módulos apresentada pelos fornecedores é calculada em “Standard Test Conditions (STC)”, em condições reais, as características físicas do meio, nomeadamente a temperatura e a irradiância, variam significativamente, dando origem a um rendimento inferior. À medida que a irradiância aumenta, existe um incremento logarítmico da eficiência, por outro lado, esta diminui linearmente à medida que a temperatura superficial dos módulos aumenta. Este tipo de perdas é quantificado directamente através da correcção da eficiência STC das células, segundo a base de dados PVGIS, as perdas devidas à radiação e temperatura na região do Porto Alto são de 11%.

As perdas de qualidade, são apresentadas pelos fornecedores, expressando a confiança dos mesmos na qualidade dos módulos, ao longo do seu período de vida útil, neste caso, o decréscimo sugerido é de 1,5%.

Os sistemas de conversão fotovoltaica possuem um sistema digital responsável por colocar os módulos fotovoltaicos no ponto de operação correspondente à potência máxima, este sistema está geralmente integrado nos inversores, sendo designado por MPPT (*Maximum Power Point Tracker*). Uma vez que cada célula fotovoltaica apresenta pequenas variações na sua temperatura superficial e irradiância em relação às restantes, cada uma acaba por ter o seu próprio valor de intensidade de corrente gerada. Segundo o modo de operação utilizado pelo MPPT, numa fileira de células é a corrente mais baixa que se assume como sendo a corrente da fileira. Apesar destas variações serem reduzidas, as restantes células apresentam valores de intensidade de corrente mais elevados que não são contabilizados na corrente efectiva da fileira, pelo que este acaba por ser outro factor de perdas a considerar, sendo denominado por “perdas de compatibilidade”. No caso dos módulos seleccionados, estas perdas são quantificadas pelo fabricante em 2% (31).

Existem ainda perdas em todos os materiais periféricos, tais como cabos DC, cabos AC, e inversores. Neste modelo, quantificam-se as perdas nos inversores com recurso ao seu rendimento (97,7%), agrupando-se as restantes em perdas ohmicas, para as quais se assume um valor global de 1% (30).

Na secção 4.4 serão analisados os impactes de três possíveis potências nominais a instalar: 50 kWp, 100 kWp e 200 kWp. Estas potências foram seleccionadas com base na curva de carga diária da instalação apresentada na figura Figura 3.11. O valor de 50 kWp representa

a carga necessária para cobrir a faixa de necessidades menos exigentes da instalação, num dia típico, o segundo valor apresentado é o equivalente do primeiro para a média dos dias analisados e o terceiro representa uma potência instalada capaz de cobrir as necessidades energéticas da fábrica durante a maioria do tempo, com excepção de alguns picos de consumo pontuais.

Para efeitos de cálculo da produção energética associada ao sistema fotovoltaico a instalar, utilizou-se um modelo de cálculo simplificado apresentado por Castro em 2011 (32). Embora este modelo não contemple directamente as variações de eficiência das células com a irradiância e a temperatura, permite a obtenção de uma estimativa da energia produzida, com um erro reduzido face ao valor real. Este modelo passa pelo cálculo da energia anual resultante da conversão de energia solar em energia eléctrica, E_{in} em kWh, considerando que a mesma é obtida através do produto entre a irradiação média anual, corrigida pelo factor de massa de ar, "H_{AM}" em kWh/ m², o rendimento de conversão energética dos módulos, $\eta_{modulos}$ (%), corrigido para as condições de irradiação e temperatura locais pelo factor de perdas "f_{GT}" e a área total do conjunto dos módulos a utilizar, expressa em m² (equações (3.43) a (3.44)).

$$E_{in} = H_{AM} \times \eta_{módulos} \times A \tag{3.43}$$

$$\eta_{módulos} = \eta_{módulosSTC} \times (1 - f_{GT}) \tag{3.44}$$

Seguidamente, calcula-se a energia que é efectivamente fornecida à rede, "E_{out}" (kWh), contabilizando as perdas referidas anteriormente, sob a forma percentual, às quais atribuímos a notação f_i, sendo "i" a designação do tipo de perdas que se pretende quantificar, como se demonstra na equação(3.45).

$$E_{out} = E_{in} \times (1 - f_{qualidade} + f_{compatibilidade} + f_{ohmicas}) \times \eta_{inversores} \tag{3.45}$$

Após o cálculo da energia fornecida à rede, é necessário relacionar a produção energética horária com o consumo energético horário, de modo a definir, para as três potências em estudo, quais as fracções utilizadas para autoconsumo e para veda à RESP, possibilitando a quantificação dos ganhos económicos, já que a electricidade produzida é remunerada de diferentes modos consoante o fim a que se destina.

Para este efeito, utilizou-se a distribuição de irradiação horária, presente na base de dados do software PVsyst, característica desta localização, para um dia representativo de cada mês e cruzou-se esta informação com os valores de irradiação mensal recolhidos com recurso ao software Meteonorm 7.2 apresentados na Tabela 3.18, de modo a obter uma estimativa do perfil de produção fotovoltaica horária típico de cada mês. Assim, foi possível comparar a produção de energia horária mensal com o perfil de consumo energético da fábrica em dias úteis e dias não-úteis, assumido como constante ao longo do ano, estimando-se a quantidade energética utilizada para autoconsumo e o excedente vendido à rede em cada mês.

Para que fosse possível estimar os benefícios financeiros desta proposta foi crucial determinar o custo médio actual da electricidade adquirida em horas de sol. Para esse efeito tomou-se como referência do perfil de consumo energético da unidade industrial a curva de carga obtida para um dia típico apresentado na Figura 3.11, cruzando-se esta informação com a tarifa eléctrica aplicada pela operadora nos horários de Verão e Inverno e extrapolando-se a informação para uma base anual. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 3.19 e permitiram concluir que o preço actual da energia eléctrica adquirida em horas de sol é de 0,098€/kWh.

Tabela 3.19 - Distribuição do Consumo Típico da Instalação Por Tarifa Energética

Período	Nº de Dias	Horas de Sol			
		Cheias	Ponta	Vazio	Super Vazio
Verão	183	10,25	3,00	0,00	0,00
Inverno	182	8,75	2,50	0,00	0,00
	Fracção de Consumo	77,6%	22,4%	0,0%	0,0%
	Preço [€/kWh]	0,101	0,089	0,100	0,060

Os benefícios económicos anuais da implementação desta tecnologia (a calcular na secção 4.4) consideram-se como sendo o resultando da soma entre a poupança associada à energia utilizada para autoconsumo, a redução do sobrecusto da potência adquirida diariamente a horas de ponta e ainda os ganhos directos resultantes da venda do excedente energético à rede, para cada uma das potências nominais em estudo.

3.2.5. Plano para Eliminação dos Imprevistos Operacionais no Doseamento

Durante o período em que o estudo dos tempos apresentado em 3.1.2 foi realizado, verificou-se que existiam anomalias recorrentes durante o fabrico. Decidiu-se então anotar o motivo de cada uma destas anomalias junto ao tempo de processamento do equipamento em questão para que se pudesse realizar uma análise estatística das causas mais frequentes.

Após esta análise concluiu-se que os imprevistos na produção levaram a um aumento de 14,6% no tempo de ciclo médio da amostra analisada. Assim, a resolução deste problema terá um impacte bastante significativo na cadência de fabrico. Aprofundando esta análise verificou-se que, a totalidade dos atrasos na produção registados, se deviam a problemas operacionais, não estando relacionados com falhas na tecnologia actualmente implementada. Os imprevistos mais frequentes foram:

- Mudança de Operador na Sala de Comando
- Alterações Súbitas ao Plano de Produção
- Alteração no Silo de Expedição a Meio da Produção de um Lote
- Célula de Doseamento Momentaneamente sem Matéria-Prima
- Atraso na Administração Manual de Matéria-Prima
- Matéria-Prima Farinada Presa em Big Bag

As diversas anomalias apresentadas podem ser agrupadas em duas categorias principais: Imprevistos relacionados com a gestão da produção (primeiros três pontos) e imprevistos referentes a falhas operacionais no doseamento (restantes). Agrupando os imprevistos deste modo, é possível concluir que 73% das perdas de tempo estão relacionadas com a gestão da produção e 27% das mesmas se devem a falhas operacionais no processo de doseamento.

Após reunião com o departamento de gestão da produção e a empresa responsável pela automação industrial concluiu-se que a primeira categoria de atrasos já tinha sido identificada e está neste momento em curso a implementação de um novo *software* de fabrico, planeamento da produção e recepção de encomendas em que existe um cruzamento de informação destes três sectores, de modo a que a processo de fabrico seja menos susceptível ao erro humano e o planeamento seja optimizado. Com a implementação deste *software* prevê-se que os atrasos mencionados sejam reduzidos significativamente, a única excepção são os que se devem às alterações súbitas no plano de produção fruto de encomendas imprevistas com prazos de entrega reduzidos.

Em relação à segunda categoria, os imprevistos operacionais no doseamento, era do conhecimento da gestão que estas anomalias existiam, no entanto, antes desta quantificação, a magnitude das mesmas era desconhecida. Estudando-se pormenorizadamente o processo de doseamento para as diferentes fórmulas, assim como o *software* de fabrico, concluiu-se que existe um operador de apoio à sala de comando cujas tarefas passam especificamente pelo reenchimento das células de armazenamento de matérias-primas secundárias e adição manual das mesmas nas receitas que assim o exigem (B332 e S800). Verificou-se ainda que, mesmo utilizando o *software* existente até à data, existe a opção de implementar sinais de aviso aos operadores antes que ocorra falta de matéria-prima em células de doseamento e big bags, desde que sejam dadas as entradas das matérias-primas, algo que não faz parte da rotina actual.

Assim, elaborou-se um conjunto de medidas, com um investimento inicial reduzido, no sentido de solucionar este problema. O plano criado inclui as seguintes acções:

- Inclusão da tarefa de dar as entradas de matérias-primas secundárias no *software* de gestão da produção na rotina diária dos operadores;
- Aquisição de um tablet e um ponto de acesso à internet (PA), de modo a que o operador de apoio à sala de comando possa dar entrada da matéria-prima no sistema de forma prática, sempre que repõe o *stock* da mesma;
- Instalação de uma buzina junto ao ponto de adição manual de matérias-primas, que emita um sinal sonoro se o produto não tiver sido carregado e o botão de aviso pressionado 20s antes do previsto;
- Acção de Formação aos operadores sobre o impacte que estas pequenas acções têm na cadência produtiva da fábrica e como utilizar as ferramentas que têm à sua disposição.

Este Plano para Eliminação dos Imprevistos Operacionais no Doseamento (PEIOD), tem potencial para eliminar as anomalias operacionais identificadas no processo de doseamento, o que se traduzirá num tempo de ciclo mais reduzido e ganhos significativos com a venda do produto final fabricado adicionalmente, no mesmo tempo total de fabrico. Por outro lado, como se viu na secção 3.2.3, uma diminuição do tempo de ciclo leva a um aumento do tempo de funcionamento em carga dos equipamentos, havendo um consumo adicional de energia. As fracções de tempo em carga associadas a este cenário de melhoria são apresentadas na Tabela 3.20. Assim, a estimativa dos impactes económicos será executada de acordo com a metodologia exposta no capítulo 433.2.3.

Tabela 3.20 - Fracções de Tempo em Carga Resultantes do Plano de Eliminação de Imprevistos Operacionais no Doseamento

Tipologia de Equipamento	Fracção de Tempo em Carga
Elevadores de Alcatruzes	63%
Transportadores Redler	61%
Ventiladores	64%
Blowers	16%
Moinhos	64%
Outros	58%
Misturadoras	48%
Elevadores de Alcatruzes	63%

3.3. Parâmetros Financeiros Utilizados na Avaliação de Viabilidade dos Investimentos Propostos

Ao longo do capítulo 4, os cenários de melhoria propostos serão avaliados do ponto de vista energético e ambiental, mas também do ponto de visto económico. Para esse efeito utilizaram-se diversos indicadores de desempenho, dos quais, o mais frequente foi o Período de Retorno do Investimento (PRI). Este índice é calculado através do quociente entre o investimento inicial e o fluxo de caixa anual decorrente desse projecto. Assim, este rácio quantifica o número de anos necessários para que o capital investido seja reposto.

Para uma avaliação mais realista recorreu-se ainda ao conceito de Valor Actual Líquido (VAL). Este é um método de avaliação de investimentos que permite determinar o valor presente de todos os fluxos de caixa previstos, descontando aos mesmos uma taxa de actualização. A taxa de actualização representa o custo de oportunidade do projecto face a um investimento alternativo. É frequente utilizar-se como meio de comparação os juros obtidos através da alocação do capital numa aplicação financeira sem risco (o exemplo típico de uma aplicação sem risco é um depósito a prazo). Neste caso optou-se pela utilização de taxas de actualização ajustadas ao grau de risco de cada projecto, o que leva à obtenção de VAL's inferiores para projectos considerados de maior risco. Incluiu-se ainda o efeito da variação da inflação ao longo dos anos. O VAL de cada projecto é calculado com recurso à equação (3.46), onde "k" representa a taxa de actualização ajustada ao risco (%), "p_t" é a variação anual da taxa de inflação prevista (%), "F_t" representa o fluxo de caixa (€), "A_0" simboliza o investimento inicial (€), que tratando-se de um custo, surge com sinal negativo e "t" é o período de tempo (em anos) no qual se prevê que o empreendimento em causa seja uma fonte de rendimento (33), (34).

$$VAL = A_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+k+p_t)^t} \tag{3.46}$$

No caso dos cenários de melhoria em que as receitas associadas resultam maioritariamente de poupanças energéticas, incluiu-se no cálculo do VAL, o aumento nos preços da electricidade adquirida à rede, "e_t" (%), pelo que este indicador se calculou utilizando a equação (3.47).

$$VAL = A_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t \times (1+e_t)^t}{(1+k+p_t)^t} \tag{3.47}$$

Analisando os fluxos de caixa decorrentes da aplicação da equação (3.46) é possível obter o período de retorno do investimento de forma mais realista do que a mencionada anteriormente, pelo que também se efectuou esse estudo.

No caso dos cenários avaliados, que representam um maior investimento inicial, realizou-se uma análise financeira mais detalhada para que existisse um maior fundamento na tomada de decisão sobre a aplicação do capital. Para este efeito utilizaram-se ainda os seguintes indicadores: Índice de Rentabilidade (IR), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Custo Nivelado da Energia (LCOE). O ÍR é calculado como o rácio entre o VAL (€) e o investimento inicial actualizado (€), representando a margem de lucro associada ao projecto em causa (%). Considerando que os equipamentos a instalar serão utilizados até ao final da sua vida útil, no final da qual apresentam um valor residual nulo, o IR é calculado com recurso à seguinte equação:

$$IR = \frac{VAL}{\sum_{t=1}^{n} \frac{A_0}{(1+k+p_t)^t}} \tag{3.48}$$

A TIR (%) representa a taxa de actualização necessária para que o valor do investimento inicial e a soma dos fluxos de caixa consequentes desse projecto se igualem. Assim, se incluirmos na mesma o efeito da inflação (%), resulta da resolução da seguinte equação:

$$VAL = 0 = VAL = A_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t \times (1+e)^t}{(1+TIR)^t} \tag{3.49}$$

Finalmente o LCOE, só é aplicável a soluções que incidam na geração de energia, representando o custo por unidade de energia produzida. O seu cálculo resulta do quociente entre a soma do investimento inicial (€), os custos de manutenção "M_t" (€) e os custos com o combustível "F_t" em euros (nulos no caso de Energias Renováveis) e a energia produzida no período de vida útil do sistema, "E_t" (kWh), como apresentado na equação (3.50).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+k+p_t)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+k+p_t)^t}} \tag{3.50}$$

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo aplicam-se as metodologias expostas no capítulo 3 com o objectivo de quantificar os impactes energéticos e ambientais dos cenáros de melhoria propostos. Efectua-se ainda uma avaliação da viabilidade financeira dos mesmos.

4.1. Análise de Impactes da Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos

A redução do consumo energético total dos moinhos fruto da instalaçã de VEV's ($\Delta E_{MMtotal}$) foi contabilizada através da equação (3.8), considerando um rendimento de 97% (35) para os VEV's, actualizamdo os valores das fracções de tempo em cargacoforme a Tabela 3.12 e os valores para a energia consumida em carga e em vazio calculados com o método explicitado em 3.1.2.

$$\Delta E_{MMtotal}[\%] = \frac{2405{,}9kWh \times 37{,}9\%}{6684{,}1kWh \times 62{,}1\% + 2405{,}9kWh \times 37{,}9\%} \times 57{,}1\% \times 97{,}0\% = 10{,}0\% \quad (4.1)$$

Tendo obtido a poupança no consumo dos moinhos, recorreu-se à equação (3.9) e estimou-se o impacte desta solução no consumo energético global da instalação fabril (ΔE_{total}), tendo em conta a fracção de consumo dos moinhos actualizada para a cadência de produção actual, calculada pelo método apresentado em 3.1.2.

$$\Delta E_{total}[\%] = \Delta E_{MMtotal}[\%] \times \frac{E_{MM}}{E_{total}} = 10{,}0\% \times 45{,}1\% = 4{,}5\% \quad (4.2)$$

Dado que esta medida não tem qualquer impacte ao nível da cadência de produção, a redução no consumo específico da fábrica é dada directamente pela redução energética calculada. Os valores resultantes dos principais cálculos envolvidos na estimativa dos impactes deste cenário são sistematizados na Tabela 4.1. Sempre que forem referidos valores de poupança monetária, estes serão calculados no pressuposto de que o consumo energético total do ano transacto se manterá.

Tabela 4.1 - Impactes da Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos para N_{vazio}=1500 rpm

Redução de Consumo Energético		
Redução de Consumo em Vazio	57,1%	-
Redução do Consumo Específico	4,5%	-
Índices de Desempenho Estimados		
Consumo Específico Previsto	9,76	kWh/ton
Custo Específico Previsto	1,1485	€/ton
Emissões Específicas	4,20	$kgCO_{2eq}$/ton
Poupança Anual		
Poupança Energética Anual	38579	kWh
Poupança Económica Anual	4538	€
Redução Anual de Emissões	14,7	$tonCO_{2eq}$

Em seguida, extrapolou-se esta análise para valores de velocidade de rotação mais reduzidos, até 1000 rpm tal como mencionado na secção 3.2.1. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Impactes da Instalação de VEV's nos Moinhos de Martelos para N_{vazio} entre 1000 rpm e 1500 rpm

V [rpm]	P [kW]	Redução no Consumo Eléctrico	Consumo Específico Previsto [kWh/ton]	Poupança Energética Anual [kWh]	Poupança Anual [€]	Redução das Emissões [ton $CO_{2_{eq}}$]
1500	10.7	4,5%	9,76	38579	4538	14,7
1400	10.0	4,7%	9,74	40387	4751	15,4
1300	9.4	4,9%	9,72	42109	4953	16,1
1200	8.8	5,1%	9,70	43745	5145	16,7
1100	8.2	5,3%	9,68	45295	5328	17,3
1000	7.7	5,4%	9,67	46759	5500	17,9

Após este estudo, verificou-se que esta medida tem potencial para reduzir o consumo específico da unidade industrial entre 4,5% e 5,4%, o que se traduzirá em poupanças monetárias anuais na ordem dos 5 mil euros. De acordo com o estudo do investimento inicial típico de VEV's desta gama de potências, realizado por Almeida et al (2008) (12), estima-se que o tempo de retorno da implementação destes equipamentos se situe entre os quatro e os cinco anos. Com o intuito de investigar a viabilidade desta solução, de um modo mais rigoroso, fez-se um pedido de cotação para a aquisição e instalação de um variador electrónico de velocidade em cada moinho de martelos.

A proposta apresentada tem um custo de 23074,80€, o que vai de encontro aos valores apresentados por Almeida et al em 2008 (12) para a gama de potências em questão. Para efeitos de cálculo do período de retorno do investimento, considerou-se ainda um aumento anual médio do preço da electricidade de 4,6% estimado através de uma regressão linear dos dados fornecidos pela EuroStat nos últimos 7 anos (36) e uma taxa de actualização do capital de 3%. Esta taxa de actualização baseia-se no risco associado ao projecto, na taxa de inflação e no custo de oportunidade, contabilizado como sendo o lucro que se obteria anualmente ao colocar o capital numa aplicação financeira sem risco. Uma vez que os juros pagos por este tipo de aplicação, em Portugal, actualmente, não excedem o 1% e que o a inflação anual média, nos últimos 10 anos é da mesma ordem de grandeza (37), os seus efeitos na taxa de actualização tendem a anular-se pelo que se considerou directamente o valor do risco associado ao projecto que, segundo (38), ao tratar-se de um investimento com capacidade extremamente forte para cumprir os objectivos financeiros, é de 3%. Uma vez que existe alguma incerteza relativa á velocidade mínima em que os moinhos de martelos irão passar a operar em vazio, tendo-se concluindo na Secção 3.2.1 que este valor se deverá situar entre as 1000 rpm e as 1500 rpm, a análise financeira foi realizada para os dois extremos do intervalo, concluindo-se que o período de retorno do investimento desta medida se situará entre 4 e 5 anos, como podemos observar na Figura 4.1.

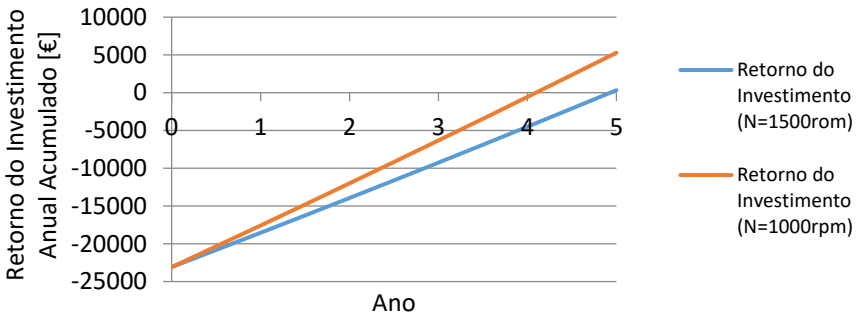


Figura 4.1 – Evolução do Retorno do Investimento Acumulado ao longo dos 5 primeiros anos

Para as mesmas condições, calculou-se ainda o valor presente do investimento (NPV), adoptando a perspectiva conservadora de que o período de vida útil dos variadores electrónicos de velocidade será de 12 anos, verificando-se que se trata de um investimento com um valor presente líquido entre 36281€ e 48867€.

4.2. Análise de Impactes da Instalação de VEV's nos Sobrepressores

A partir das equações (3.12) e (3.13), calculam-se as poupanças energéticas em cada um dos regimes, face à situação actual:

$$\Delta P_{Mvazio}[\%] = 1 - \frac{8{,}2\%}{22{,}7\%} = 62{,}0\% \tag{4.3}$$

$$\Delta P_{Mc\,\mathrm{arg}\,a}[\%] = 1 - \frac{49{,}2\%}{57{,}3\%} = 13{,}6\% \tag{4.4}$$

Sabendo que, após a instalação da válvula de três vias referida anteriormente, a fracção de tempo em carga média dos sobrepressores é de 15% e que a energia semanal consumida em vazio e em carga é de 468 kWh e 1144 kWh, respectivamente, como determinado na secção 3.1.2, determina-se a poupança energética característica de cada regime, com recurso às equações (3.14) e (3.15).

$$\Delta E_{SPvazio}[\%] = 62{,}0\% \times \frac{467{,}7kWh \times 84{,}8\%}{467{,}7kWh \times 84{,}8\% + 1144{,}4kWh \times 15{,}2\%} = 43{,}3\% \tag{4.5}$$

$$\Delta E_{SPc\,\mathrm{arg}\,a}[\%] = 13{,}6\% \times \frac{1144{,}4kWh \times 15{,}2\%}{467{,}7kWh \times 84{,}8\% + 1144{,}4kWh \times 15{,}2\%} = 4{,}1\% \tag{4.6}$$

Considerando um rendimento dos VEV's de 97% (39), a poupança energética dos sobrepressores face à situação actual é dada pela equação (3.16).

$$\Delta E_{SPtotal}[\%] = (43{,}3\% + 4{,}1\%) \times 97{,}0\% = 46{,}0\% \tag{4.7}$$

Recorrendo à equação (3.17) obtém-se o impacte que esta solução teria no consumo energético global da fábrica.

$$\Delta E_{total}[\%] = 46{,}0\% \times 5{,}2\% = 2{,}5\% \tag{4.8}$$

Uma vez que esta medida não altera a cadência de produção, a redução energética é igual à redução no consumo específico da unidade industrial. À primeira vista esta poupança parece reduzida, contudo, tendo como referência o consumo energético anual de 2016, 2,5% traduzir-se-iam numa redução energética anual de 21125 kWh, o que, tendo em conta que o custo unitário médio da electricidade após as melhorias introduzidas em 2017 é de 0,1176€, se traduz numa poupança monetária anual de 2485€. Na Tabela 4.3 são sistematizados os resultados principais desta análise.

Tabela 4.3 – Impactes da Instalação de VEV's nos Sobrepressores

Redução de Consumo Energético		
Redução de Consumo em Vazio	69,5%	-
Redução do Consumo Específico	2,5%	-
Índices de Desempenho Estimados		
Consumo Específico Previsto	9,97	kWh/ton
Custo Específico Previsto	1,2024	€/ton
Emissões Específicas	4,29	$kgCO_{2eq}$/ton
Poupança Anual		
Poupança Energética Anual	21125	kWh
Poupança Económica Anual	2485	€
Redução Anual de Emissões	8,1	$tonCO_{2eq}$

Segundo Almeida et al (12), o preço unitário médio para VEV's adequados para potências desta ordem de grandeza (22 kW) ronda os 2500€, logo o investimento inicial deverá ser de aproximadamente 5000€. Efectuou-se um pedido de cotação para a aquisição de equipamentos e respectiva instalação, a uma empresa dedicada ao sector, que apresentou uma proposta com um valor total de 7800€. Desta forma, este projecto terá um período de retorno de investimento simples de cerca de 3 anos, apresentando-se como uma soluçãocom potencial. Para uma análise de impactes financeiros mais detalhada, utilizou-se a taxa de actualização e o aumento anual do preço da electricidade propostos em 4.1, obtendo-se o resultado apresentados graficamente na Figura 4.2 e um VLA, para um tempo de vída útil conservativo de 12 anos, de 22218€.

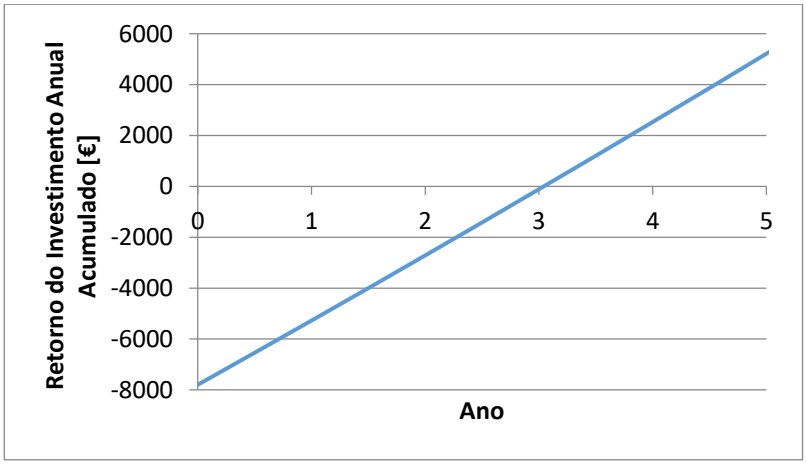


Figura 4.2 – Evolução do Retorno do Investimento Anual Acumulado Característico do Cenário 2

4.3. Análise de Impactes da Substituição do Sistema de Doseamento do Milho

Nesta secção analisa-se, de acordo com o método apresentado na Secção 3.2.3, o impacte que cada uma das disposições propostas terá no consumo específico da unidade fabril e a partir do valor obtido estimam-se os ganhos anuais e correspondente período de retorno do investimento avaliando-se a viabilidade do mesmo. Embora sejam apresentados todos os resultados obtidos, é apresentado apenas um exemplo de cálculo para cada passo de modo a reduzir a extensão do capítulo. De entre as disposições apresentadas na Tabela 3.17, seleccionou-se a "1BPar" para efeitos de cálculo exemplificativo, uma vez que contempla os dois tipos de transportadores cuja metodologia de dimensionamento foi exposta na secção 3.2.3.

O primeiro passo consiste no dimensionamento da potência consumida por cada um dos transportadores de parafuso incluídos na disposição em análise, que terão como função o transporte do milho entre as células de doseamento e a balança. O caudal objectivo, que servirá de base ao dimensionamento, é calculado com recurso à equação (3.18)

$$Q_{objectivo} = \frac{990[kg]}{24[s]} \times \frac{1}{780}\left[\frac{m^3}{kg}\right] = 0{,}053[m^3/\mathrm{s}] \tag{4.9}$$

Tendo em conta que a disposição apresentada contempla a existência de dois transportadores a funcionar em paralelo, cada um deles transportará metade deste caudal, ou seja, 0,026 [kg/s] = 95,2 $[m^3/h]$ = 3361,7 $[ft^3/h]$ = 163693,2 [lbs/h]. Considerando que a hélice deste transportador de parafuso terá um passo igual ao diâmetro na maioria da sua extensão, não é necessário corrigir o caudal, pelo que segundo a equação (3.20 teremos $Q_{projecto} = Q_{objectivo}$. Consultando a iiF.ii (Anexo F) verifica-se que para este caudal de projecto é recomendado um diâmetro de hélice de 3556 mm ao qual corresponde uma velocidade de rotação máxima de 140 rpm e um caudal a 1 rpm de 31,2 $[ft^3/h]$, pelo que, recorrendo à equação (3.21), é possível calcular a velocidade de rotação a que o componente irá operar.

$$S_{projecto} = \frac{3361{,}7}{31{,}2} = 107{,}8rpm \tag{4.10}$$

De acordo com as análises providenciadas pelo laboratório da fábrica, o valor médio do teor de humidade do milho utilizado é de 12,7%, o que segundo (17) se traduz num coeficiente de atrito cinemático entre o milho e a superfície do transportador (aço macio) de 0,55 (MF). A um diâmetro de hélice de 3556 mm corresponde um factor DF de 78 (ivF.iv/Anexo F). Considerando que a eficiência de transmissão típica de um mecanismo de carretos e corrente com motorredutor é de 88% (16), e que se utilizam chumaceiras de rolamentos esféricos (HBF=1,0 - v1F.v/Anexo F), é possível calcular a potência mecânica necessária, com recurso às equações (3.22) e (3.24).

$$FHP = \frac{78{,}0 \times 1{,}0 \times 7{,}0m \times 3{,}3\,ft/m \times 107{,}8rpm}{1000000} = 0{,}19hp = 0{,}14kW \tag{4.11}$$

$$MHP = \frac{163693{,}2lbs/h \times 0{,}55 \times 7{,}0m \times 3{,}3\,ft/m}{1000000} = 2{,}07hp = 1{,}54kW \tag{4.12}$$

Dado que a potência necessária para vencer o atrito entre o material e a superfície (MHP) é inferior a 5 [hp], esta tem que ser corrigida de acordo com a vii F.vii (Anexo F), obtendo-se aproximadamente 3,12 [hp]. Assim, a potência mecânica total é calculada da seguinte forma:

$$TSHP = \frac{0{,}19hp + 3{,}12hp}{0{,}88} \times 1{,}0 = 3{,}76hp = 2{,}81kW \quad (4.13)$$

Considerando um motor com eficiência de 90% (valor mínimo admitido para esta gama de potências segundo a norma europeia (40)), a potência eléctrica consumida em condições normais de funcionamento, em carga e em vazio, será dada pela equação (3.25) e (3.26), respectivamente.

$$P_e = \frac{2{,}81kW}{0{,}90} = 3{,}12kW \quad (4.14)$$

$$P_{evazio} = \frac{0{,}14kW}{0{,}90 \times 0{,}88} = 0{,}18kW \quad (4.15)$$

Conclui-se assim que os transportadores de parafuso a instalar irão necessitar de 3,12 kW em carga e 0,18 kW em vazio, sempre que operarem em condições de projecto. De modo a garantir que não existam encravamentos que originem paragens na produção, a potência nominal do motor eléctrico a instalar deverá ter em conta o coeficiente de segurança apresentado na metodologia (equação (3.27)).

$$P_n = 3{,}12kW \times 2{,}22 = 6{,}93kW \quad (4.16)$$

Os motores eléctricos com a potência nominal mais próxima da calculada, disponíveis no mercado são os de 7,5[kW], sendo estes que se deverão instalar.

Seguidamente demonstra-se o processo homólogo de cálculo da potência para o caso dos transportadores *redler* a utilizar em prol dos transportadores de parafuso no caso de se optar pela disposição "1BRed". Consultando as dimensões *standard* utilizadas no projecto de transportadores *redler* pelo fabricante da maquinaria presente na fábricas de rações em estudo e as respectivas capacidades e considerando o caudal objectivo calculado anteriormente, deverá optar-se pelo modelo TR-315, (315mm x 465mm), cuja capacidade máxima é de 0,042 [m^3/s]. A área útil recomendada para este tipo de transportadores é de 45%. De acordo com (41), transportadores *redler* com estas dimensões utilizam correntes com massas específicas típicas da ordem dos 10 kg por metro. Mecanismos de corrente e polia apresentam rendimentos mecânicos típicos de 0,95 e coeficientes de atrito de 0,2 em condições de lubrificação correctas (42). Nas condições descritas as potências eléctricas consumidas em carga e em vazio, calculadas pelas equações (3.30) e (3.31) tomarão os seguintes valores.

$$P_e = \frac{((0{,}45 \times 7m \times 0{,}315m \times 0{,}465m) \times 780kg/\mathrm{m}^3 \times 0{,}55 + 10kg/m \times 7m \times 0{,}2)}{0{,}95 \times 0{,}86} \times 9{,}81m/s^2 \times \frac{0{,}026m^3/s}{0{,}45 \times 0{,}315m \times 0{,}465m} = 1{,}021kW \quad (4.17)$$

$$P_{evazio} = \frac{10kg/m \times 7m \times 0{,}2}{0{,}95 \times 0{,}86} \times 9{,}81m/s^2 \times \frac{0{,}026m^3/s}{0{,}45 \times 0{,}315m \times 0{,}465m} = 67W \quad (4.18)$$

Recorrendo novamente à equação (3.27), a potência nominal do motor a instalar será a seguinte:

$$P_n = 1{,}021kW \times 2{,}22 = 2{,}2kW \quad (4.19)$$

Através deste método determinaram-se as potências eléctricas consumidas em condições de funcionamento normal, em cada um dos regimes de funcionamento e as potências eléctricas a instalar nos transportadores redler presentes em cada uma das disposições

propostas para o novo sistema de doseamento de milho. Os resultados deste estudo são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados do Dimensionamento dos Transportadores *Redler* Presentes nas Disposições Propostas para o Novo Sistema de Doseamento de Milho

Disposição	Capacidade $[m^3/h]$	Dimensões			Potência Eléctrica em Vazio[kW]	Potência Eléctrica em Carga[kW]	Potência a Instalar[kW]
		Comprimento[mm]	Largura[mm]	Altura[mm]			
1BPar	110,5	12000	315	465	0,13	1,96	4,0
1BRed	110,5	12000	315	465	0,13	1,96	4,0
	95,2	7000	315	465	0,07	1,02	2,2
	95,2	7000	315	465	0,07	1,02	2,2
2BRaz	110,5	12000	315	465	0,13	1,96	4,0
	80,0	6000	250	360	0,07	0,74	2,2
	80,0	9000	250	360	0,11	1,13	3,0

Do leque de equipamentos constituintes de cada uma das disposições sugeridas para o novo sistema de doseamento do milho, apenas os transportadores apresentam um consumo energético significativo, pelo que, após o cálculo da potência consumida por cada equipamento, se torna possível avaliar os impactes de cada solução no consumo específico da fábrica.

Com recurso aos dados recolhidos em 3.1.2 é possível estimar o peso relativo deste sistema na energia total consumida pela instalação fabril, através do quociente entre os valores de energia consumidos por cada um dos 6 equipamentos constituintes do sistema de doseamento de milho actual e o valor total da energia consumida na semana analisada.

$$\frac{E_{DM}}{E_{Total}} = \frac{12{,}56kWh + 11{,}72kWh + 2{,}60kWh + 2{,}71kWh + 3{,}94kWh + 4{,}14kWh}{10712{,}97kWh} \times 100 = 0{,}35\% \quad (4.20)$$

Dado o peso relativo diminuto dos transportadores de milho para o consumo global da instalação, quaisquer impactes energéticos fruto de melhorias tecnológicas será reduzido, as vantagens do cenário de melhoria passam sobretudo pelo aumento da cadência de produção, que é neste momento um objectivo primordial da cooperativa.

Em seguida efectua-se o cálculo dos impactes energéticos referentes a cada uma das disposições apresentadas, de acordo com o método exposto na secção 3.2.3. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5. De salientar que todos os valores foram obtidos tendo em conta que o tempo de funcionamento anual se mantém após o aumento da cadência de produção, o que leva a um aumento da quantidade total de rações produzidas. Uma vez que o tempo de ciclo se reduz em 21 segundos e a cadência de produção aumenta de 23,8 [ton/h] para 25,4 [ton/h], dá-se um aumento da produção em 6,88%.

Tabela 4.5 - Variação no Consumo Específico Causada Pelas Disposições Estudadas Para o Doseamento do Milho

Disposição	E_{actual} [kWh]	$E_{prevista}$ [kWh]	$\Delta E_{total}[\%]$	$\Delta \mathrm{Prod}[\%]$	$\Delta Ce[\%]$	$Ce_{prevista}[€/ton]$
1BPar	11232	11452	1,96%	6,88%	-4,61%	1,1471
1BRed	11232	11445	1,90%	6,88%	-4,67%	1,1464
2BRaz	11232	11437	1,83%	6,88%	-4,73%	1,1455

Embora o consumo específico diminua nas 2 disposições estudadas, a produção aumenta numa proporção superior, pelo que o valor absoluto da energia consumida deverá ser superior. Por outro lado, haverá um ganho significativo decorrente da comercialização do incremento das rações produzidas, para estimar este valor assume-se uma margem de lucro de

5€ por cada tonelada de ração produzida (valor fornecido pela gestão da cooperativa). A variação dos custos com a electricidade, os ganhos com a comercialização da produção adicional e os ganhos líquidos de cada disposição, calculados com as equações (3.34) a (3.36), são apresentados na Tabela 4.6. Estes valores foram obtidos tendo em conta a produção anual de 2016, 74618 toneladas e o custo específico actual de 1,2024 euros por tonelada.

Tabela 4.6 – Ganhos Líquidos Anuais Obtidos com Cada Disposição Proposta Para o Doseamento do Milho

Disposição	$\Delta CustosEnergéticos[€]$	Ganhos Produção Extra [€]	Ganhos Líquidos Anuais [€]
1BPar	1757	25678	23921
1BRed	1702	25678	23977
2BRaz	1638	25678	24041

Definindo como critério de viabilidade de investimento um período de retorno simples inferior a 5 anos, considera-se um investimento de valor qualquer cotação de investimento inicial inferior aos valores apresentados na Tabela 4.7. Caso se inclua no cálculo do PRI, uma taxa de actualização de 3%, obtida de acordo com as condições apresentadas na secção 4.1 obtêm-se os valores máximos de investimento presentes na terceira coluna da mesma tabela.

Tabela 4.7 - Valores Máximos Para Investimento de Valor em Cada Disposição de Doseamento do Milho

Disposição	Valor Máximo para Investimento de Valor [€]	
	$PRI_{simples}$	$PRI_{r=3\%}$
1Bpar	119604	112838
1Bred	119884	113102
2Braz	120203	113404

Fizeram-se pedidos de cotação das três disposições à empresa que fornece habitualmente os componentes mecânicos à cooperativa Porto Alto Rações. Como se conjecturou em 3.2.3, a disposição "2BRaz" representa um investimento demasiado avultado para um incremento no tempo de ciclo de apenas 21 segundos, pelo que só faria sentido quando incluído num plano de melhoria geral da linha de produção. A proposta apresentada pelos fornecedores foi de 251925€, o que excede em larga escala o valor calculado para um investimento de valor. Não se obteve resposta para os restantes pedidos de cotação, no entanto verifica-se que o PIR apresenta uma variação bastante reduzida consoante a disposição adoptada já que a vasta maioria dos benefícios económicos resulta do incremento productivo, que é constante para todas as soluções propostas. Deste modo, de acordo com o critério de viabilidade estabelecido no capítulo anterior, um investimento em qualquer uma das restantes disposições é considerado de valor se o investimento inicial não exceder um valor de cerca de 120000€.

4.4. Análise de Impactes da Instalação de Unidade de Produção para Autoconsumo de Energia Fotovoltaica

Com base na metodologia introduzida em 3.2.4 procedeu-se ao dimensionamento do conjunto de painéis solares a instalar. Em primeiro lugar, efectua-se a selecção da inclinação

mais adequada. Através da execução de simulações no software Meteonorm 7.2 para o leque de ângulos de inclinação entre 20º e 40º obtiveram-se os resultados presentes na Figura 4.3, onde se pode concluir que a irradiação solar anual máxima é obtida entre os 30º e os 35º de inclinação, totalizando um valor de cerca de 2015 kWh/m².

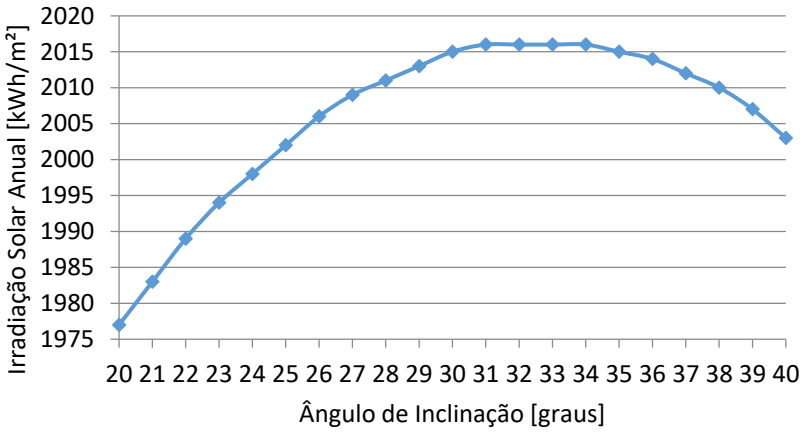


Figura 4.3 - Variação da Irradiação Incidente Anual com o ângulo de Inclinação dos Painéis Solares

Analisando as equações $$d_1 = \frac{b \times sen(\alpha)}{\tan(\beta_{min} - \gamma)}$$ (3.41) e (3.42), verifica-se que um ângulo de inclinação menor permite a utilização de menores distâncias entre fileiras, pelo que se optou pelo menor valor do intervalo de maximização da irradiação incidente, 30º. Uma vez que a altura mínima do sol durante o ano, a ocorrer no dia 22 de Dezembro pelas 08:00 é de apenas 6,14º (Figura 3.22), o que levaria a distâncias entre fileiras inexequíveis, de aproximadamente 10 metros e sabendo que os valores máximos da irradiação solar são atingidos entre as 10:00 e as 14:00, considerou-se como β_{min} o menor ângulo de elevação solar ocorrido neste intervalo horário, chegando-se ao valor de 21,6º. Para estas condições, a distância entre fileiras (d) e a distância vertical, vista em planta, entre fileiras (d1), são calculadas do seguinte modo:

$$d_1 = \frac{1{,}7m \times sen(30{,}0^o)}{\tan(21{,}6^o)} = 2{,}1m \quad (4.21)$$

$$d = 2{,}1m + 1{,}7m \times \cos(21{,}6^o) = 3{,}7m \quad (4.22)$$

Sabendo-se as dimensões de cada módulo e as distâncias entre si, é possível calcular a área total necessária à instalação de cada uma das potências nominais em estudo. Uma vez que cada módulo fotovoltaico apresenta uma potência nominal de 300 Wp, a estas potências correspondem 167, 334 e 667 módulos Sunmodule Plus SW300 MONO, respectivamente. A área necessária para a potência máxima considerada (200 kWp) é de aproximadamente 2366 m² dos quais 969 m² correspondem à área total dos painéis e 1397 m² são utilizados entre fileiras de odo a garantir que não existe sombreamento entre painéis nas principais horas de sol. Visto que a área calculada é bastante inferior à área disponível para instalação, conclui-se que a área não é uma das condicionantes deste projecto.

Segue-se a avaliação dos impactes energéticos deste cenário de melhoria, de acordo com o procedimento descrito em 3.2.4. Os módulos seleccionados apresentam um rendimento

STC de 17,89%, corrigindo este valor para as perdas de irradiância e temperatura características da zona do Porto Alto, obtém-se:

$$\eta_{\text{modulos}} = 0{,}1789 \times (1 - 0{,}11) = 0{,}1592 \tag{4.23}$$

Calcula-se então a energia convertida pelo sistema. A título de exemplo demonstra-se o cálculo para a potência instalada de 50 kWp, apresentando-se os restantes resultados na Tabela 4.8:

$$E_{in} = 2015[\text{kWh/m}^2] \times 0{,}1592 \times 244[\text{m}^2] = 77060\text{kWh} \tag{4.24}$$

$$E_{out} = 77060[\text{kwh}] \times (1 - 0{,}015 + 0{,}02 + 0{,}01) \times 0{,}977 = 75287\text{kWh} \tag{4.25}$$

Tabela 4.8 – Energia Eléctrica Anual Produzida por Cada uma das Potências de Instalação em Análise e Correspondente Energia Útil

$P_n[kWp]$	$E_{in}[kWh]$	$E_{out}[kWh]$
50	77060	75287
100	154120	150575
200	307778	300698

Resta a estimativa das fracções utilizadas para autoconsumo e para venda à RESP, de modo a possibilitar a quantificação dos ganhos económicos tendo em consideração que a electricidade produzida é remunerada de diferentes modos consoante o fim a que se destina. Recorrendo à distribuição de irradiação horária, presente na base de dados do software PVsyst, para um dia representativo de cada mês e aos valores de irradiação mensal, apresentados na Tabela 3.18, obtém-se uma estimativa do perfil de produção fotovoltaica horária típico de cada mês. Da comparação deste perfil com a curva de carga típica da fábrica em dias úteis e dias não-úteis, assumido como constante ao longo do ano, resulta a quantidade energética utilizada para autoconsumo e o excedente vendido à rede em cada mês. Nas Figuras 4.4 e 4.5 apresentam-se, a título de exemplo os resultados obtidos sobre a forma gráfica para o mês de Junho. Os passos intermédios que deram origem às figuras mencionadas estão presentes no Anexo D. Os valores anuais da energia eléctrica produzida que é utilizada para autoconsumo e vendida à RESP estão dispostos na Tabela 4.9.

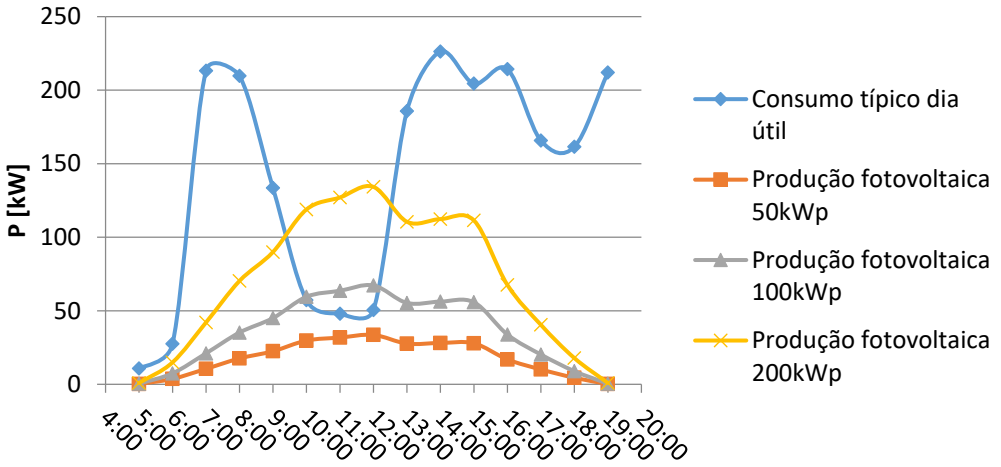


Figura 4.4 – Comparação entre o Perfil de Carga Típico de um dia Útil e o Perfil de Produção de Cada uma das Potências de Instalação em Estudo (Junho).

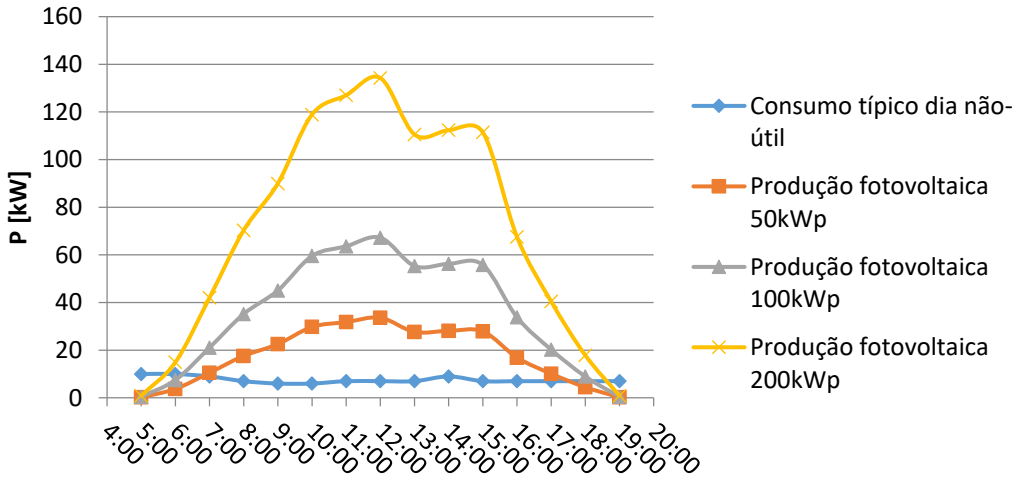


Figura 4.5 – Comparação entre o Perfil de Carga Típico de um dia Não-Útil e o Perfil de Produção de Cada uma das Potências de Instalação em Estudo (Junho).

Tabela 4.9 Fracções Energéticas Anuais Utilizadas para Autoconsumo e Excedente Vendido à RESP Mediante a Potência de Instalação.

50 kWp	100 kWp	200 kWp
Energia anual utilizada para autoconsumo		
60213 kWh	107507 kWh	174688 kWh
80%	71%	58%
Excedente anual vendido à rede		
15074 kWh	43068 kWh	126010 kWh
20%	29%	42%

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que, tal como seria de esperar, nos dias úteis, a maioria da energia gerada é utilizada para fins de autoconsumo, enquanto a energia convertida nos dias em que a fábrica não opera é maioritariamente injectada na RESP. É ainda possível observar que, à medida que a potência instalada aumenta, o excedente energético sofre

um acréscimo. Uma vez que o preço de venda de energia à rede é inferior ao preço a que a energia eléctrica é adquirida nas horas de sol, prevê-se que as vantagens económicas se vão desvanecendo à medida que a potência instalada aumenta.

Segue-se a avaliação da viabilidade do investimento para cada uma das potências estudadas. Como mencionado na secção 3.2.4, para além dos ganhos resultantes da energia consumida em regime de autoconsumo e dos lucros obtidos através da venda do excedente de produção à rede eléctrica nacional, existe ainda uma terceira fonte de poupança associada a este cenário de melhoria. Este ganho adicional resulta da redução dos custos alocados à taxa de aquisição de potência eléctrica em horas de ponta, que actualmente apresenta um valor médio mensal de 97 kW.

Apresentam-se, em seguida, os cálculos realizados para a potência instalada de 50kWp, sendo o resumo das três situações em estudo exposto na Tabela 4.10.

$$\text{Poupança}_{\text{Autoconsumo}} = 60213[\text{kWh}] \times 0{,}098[€/\text{kWh}] = 5905€ \tag{4.26}$$

$$\text{Redução do Sobrecusto da Potência em Horas de Ponta} = 0{,}2641\left[\frac{€}{\text{kW.dia}}\right] \times 365[\text{dias}] \times 50[\text{kWp}] = 4820€ \tag{4.27}$$

$$Lucros_{Vendas\ \text{Re}\ de} = 15074\,[\text{kWh}] \times 0{,}04536\left[\frac{€}{\text{kWh}}\right] = 615€ \tag{4.28}$$

$$\text{Ganhos Totais} = 5905€ + 4820€ + 615€ = 11340€ \tag{4.29}$$

Tabela 4.10 – Ganhos Económicos Totais Provenientes de Cada Potência de Instalação em Estudo

50 kWp	100 kWp	200 kWp
Poupança Autoconsumo		
5905€	10543€	17132€
Lucro Venda à Rede		
615€	1758€	5144€
Redução do Sobrecusto da Potência em Horas de Ponta		
4820€	9320€	9320€
Ganhos Anuais Totais		
11340€	21621€	31596€

De modo a avaliar a viabilidade financeira deste cenário de melhoria, efectuou-se um pedido de cotação, a uma empresa especialista no sector, para a potência de instalação com maior percentagem de energia utilizada para autoconsumo, 50 kWp. Em resposta ao pedido efectuado, a empresa em causa elaborou uma proposta para uma UPAC fotovoltaica de 58 kWp justificando o acréscimo de potência por motivos de acerto de painéis. O valor apresentado foi de 77700€.

Aplicando todo o procedimento descrito anteriormente à potência de 58kWp, obtém-se uma produção energética anual de 87460 kWh, dos quais 78% são utilizados para autoconsumo e 22% são vendidos à rede. Em termos financeiros, esta potência de instalação origina ganhos anuais de 12690€ fruto da poupança energética e redução da tarifa aplicada a horas de ponta e 883€ resultantes da venda do excedente energético à rede, perfazendo um ganho total anual de 13572€. Deste modo, PRI simples deste projecto é de 5,7 anos.

Com o intuito de realizar uma análise financeira detalhada, utilizaram-se os conceitos apresentados na secção 3.3 de modo a realizar uma estimativa de fluxos de caixa (Tabela 4.11) considerando como período de vida útil, os 25 anos fixados pelo fornecedor como período de garantia do decréscimo anual linear da eficiência dos módulos da ordem dos 0,68%. Segundo (30), os custos de manutenção anuais são da ordem dos 0,025€//W_P. Nesta análise utilizaram-se os parâmetros financeiros apresentados na secção 4.1.

Tabela 4.11 – Análise de Fluxos de Caixa Decorrentes da Implementação do cenário D

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Despesas									
Manutenção	0	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Receitas									
Autoconsumo	0	12690	12604	12517	12431	12345	12258	12172	12086
Autoconsumo tarifa actualizada	0	13271	13784	14316	14868	15441	16035	16651	17290
Venda à rede	0	883	877	871	865	859	853	847	841
Venda à rede tarifa actualizada	0	894	900	906	911	917	923	928	934
Análise Cash Flows									
Investimento	77700	0	0	0	0	0	0	0	0
Receitas	0	14165	14684	15222	15780	16358	16958	17579	18224
Despesas	0	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Cash Flow sem Impostos	-77700	12715	13234	13772	14330	14908	15508	16129	16774
Cash Flow Actualizado	-77700	11995	11778	11563	11350	11140	10932	10727	10524
Cash Flow Acumulado	-77700	-65705	-53927	-42363	-31013	-19873	-8940	1787	12311
Ano	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Despesas									
Manutenção	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Receitas									
Autoconsumo	11999	11913	11827	11741	11654	11568	11482	11395	11309
Autoconsumo tarifa actualizada	17952	18639	19351	20089	20854	21647	22469	23321	24204
Venda à rede	835	829	823	817	811	805	799	793	787
Venda à rede tarifa actualizada	940	945	951	957	962	968	973	979	984
Análise Cash Flows									
Investimento	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Receitas	18892	19584	20302	21046	21816	22615	23443	24300	25189
Despesas	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Cash Flow sem Impostos	17442	18134	18852	19596	20366	21165	21993	22850	23739
Cash Flow Actualizado	10324	10126	9931	9738	9549	9361	9177	8995	8816
Cash Flow Acumulado	22634	32760	42691	52430	61978	71340	80516	89511	98327

Ano	18	19	20	21	22	23	24	25
Despesas								
Manutenção	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Receitas								
Autoconsumo	11223	11137	11050	10964	10878	10791	10705	10619
Autoconsumo tarifa actualizada	25119	26067	27049	28066	29120	30212	31342	32512

Venda à rede	781	775	769	763	757	751	745	739
Venda à rede tarifa actualizada	990	995	1001	1006	1011	1017	1022	1027
Análise Cash Flows								
Investimento	0	0	0	0	0	0	0	0
Receitas	26109	27062	28050	29072	30131	31228	32364	33539
Despesas	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Cash Flow sem Impostos	24659	25612	26600	27622	28681	29778	30914	32089
Cash Flow Actualizado	8639	8465	8294	8125	7959	7796	7635	7477
Cash Flow Acumulado	106966	115431	123725	131850	139810	147605	155240	162717

As análises de fluxos de caixa efectuadas, permitem a determinação de um conjunto de indicadores financeiros que servirão de base à decisão sobre a viabilidade económica deste projecto e qual a potência de instalação a seleccionar. Os indicadores utilizados nesta análise foram: o Índice de Rentabilidade (IR), o Valor Actual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Período de Retorno do Investimento (PRI) e ainda o Custo Nivelado da Energia (LCOE) e calculam-se através das equações(3.47) a(3.50), sendo apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Índices de Desempenho Financeiro da UPAC fotovoltaica

Potência Instalada [kW]	IR	VAL [k€]	TIR	PRI [anos]	LCOE [€/kWh]
58	2,1	162,7	19,1%	7,0	0,057

Verifica-se que este é um,investimento com retorno financeiro, na medida em que o seu VAL é de 162700€, gerando ao longo do período de vida útil, um conjunto de fluxos de caixa que representa mais do dobro do investimento inicial (IR=2,1). Este empreendimento gera retornos anuais de 19,1%, o que é bastante superior às aplicações financeiras de risco semelhante disponíveis no mercado actual. Conclui-se ainda que a energia eléctrica gerada através deste sistema, apresentará um custo nivelado de 0,057€/kWh, sendo inferior à electricidade adquirida à rede em qualquer horário presente na tarifa em vigor, com a vantagem adicional desta energia estar disponível nas horas de “cheias” e “ponta”, precisamente as mais dispendiosas e, em simultâneo, aquelas em que a fábrica labora. Analisando o PRI contata-se que a rentabilidade deste projecto é obtida após um horizonte temporal superior aos restantes, pelo que se deve encarar o mesmo como um investimento de longo prazo.

4.5. Análise de Impactes do Plano para Eliminação dos Imprevistos Operacionais no Doseamento

Tal como exposto na secção 3.2.5, as perdas de tempo devido a anomalias operacionais no processo de fabrico resultam em perdas na cadência de produção da ordem dos 14,6%, sendo que os imprevistos operacionais no doseamento correspondem a 27% desse valor, contribuindo directamente para um aumento do tempo de ciclo da ordem dos 3,9%, o que, tendo em conta o tempo de ciclo médio actual de 5 minutos e 33 segundos, corresponde a uma média de 12 segundos de atraso por cada ciclo de 2200 kg, ou seja, uma redução na cadência de produção de aproximadamente 0,9 [ton/h].

Deste modo, assumindo que as medidas propostas são correctamente implementadas no quotidiano dos operadores, eliminando as anomalias identificadas e o tempo total de fabrico do ano transacto se mantém, prevê-se um acréscimo de 2941 toneladas anuais. Segundo os dados fornecidos pela gestão, a margem de lucro por tonelada é de aproximadamente 5€, pelo que esta medida tem potencial para aumentar as receitas anuais em cerca de 14707€.

Por outro lado, como mencionado em 3.2.5, a redução do tempo de ciclo irá originar fracções de tempo em carga dos equipamentos superiores (Tabela 3.20), aumentando o consumo energético para o mesmo tempo de fabrico. O cálculo da variação de consumo é efectuado seguindo a metodologia utilizada em 4.3, obtendo-se um consumo semanal de 11371 kWh, o que corresponde a um acréscimo de 1,2% face à situação actual.

Após quantificar os impactes no consumo energético e na cadência de produção, foi possível quantificar a variação no consumo específico associada a este cenário, de acordo com a equação (3.33).

$$\Delta c_e[\%] = \frac{100\% + 1{,}2\%}{100\% + 3{,}9\%} - 100\% = -2{,}6\% \tag{4.30}$$

A uma redução no consumo específico de 2,6% corresponde um consumo específico previsto de 9,96 [kWh/ton] e um custo específico de 1,17 [€/ton]. Os custos energéticos adicionais e os ganhos líquidos associados à produção anual adicional são calculados com recurso à equações(3.34) e (3.36), respectivamente.

$$\Delta CustosEnergéticos = 74618ton \times (1 + 0{,}0394) \times 1{,}1712€/ton - 74618ton \times 1{,}2024€/ton = 1110€ \tag{4.31}$$

$$GanhosLíquidos = 14707€ - 1070€ = 13637€ \tag{4.32}$$

Uma vez que os únicos custos associados a esta medida consistem no valor do tablet e do PA a adquirir, estimados em 200€, esta medida apresenta um período de retorno sobre o investimento (PRI) inferior a um mês. Assim, a sua aplicação não está dependente da disponibilidade financeira da cooperativa, mas sim da capacidade da gestão para sensibilizar os operadores do impacte que pequenas alterações no seu quotidiano têm no quotidiano da fábrica e de lhes proporcionar a formação adequada.

4.6. Comparativo de Cenários e Impactes Conjuntos

Ao analisar cada um dos cenários de melhoria propostos numa óptica individual, é possível estabelecer uma hierarquia de prioridades com base na comparação entre o PRI, o valor do investimento Inicial e o impacte que cada investimento tem no custo específico. Na Tabela 4.13 sintetizam-se estes dois índices de **desempenho para cada uma das propostas**.

Tabela 4.13 – Principais Indicadores de Desempenho de Cada Cenário de Melhoria

Proposta de Melhoria	Impacte no Custo Específico [€/ton]	Investimento Inicial [€]	PRI
A - VEV's Moinhos de Martelos	0,06	23075	4,5
B - VEV's Sobrepressores	0,03	7800	3,3
C - Substituição do Sistema Doseamento de Milho	0,06	Até 120000	5,0
D - UPAC	0,15	77700	7,0
E - PEIOD	0,03	200	0,0

Observando a tabela apresentada conclui-se, naturalmente, que a prioridade passa pela implementação do cenário E, já que esta medida apresenta um investimento inicial praticamente

nulo e um potêncial de redução do custo específico tão elevado quanto o da instalação de VEV's nos moinhos de martelos, ou seja, 3 cêntimos por tonelada. Já o capital investido na adopção da proposta B(7800 €) será recuperado em cerca de 3,3 anos, possibilitando uma redução de 3 cêntimos por tonelada. Tendo em conta o reduzido investimento inicial e PRI, esta proposta surge em segundo lugar na hierarquia das prioridades. Seguindo o mesmo critério, implementação do cenário A deverá ser o investimento seguinte a realizar.

Os restantes cenários de melhoria deverão ser encarados numa óptica de longo prazo, já que envolvem investimentos iniciais superiores e, consequente, possível necessidade de financiamento. A adopção da proposta D representa um investimento inicial de 77700€, resultando num PRI de 7 anos, contudo o período de vida útil deste projecto é de 25 anos, pelo que representa um VAL de 163000 €, sendo claramente uma proposta de valor. O cenário C é a única solução apresentada que possibilita o aumento da cadência de produção através da implementação de tecnologia, pelo que, se num cenário futuro as necessidades de produção aumentarem para lá da capacidade actual da fábrica, esta alteração pode evitar a abertura de um terceiro turno e consequentes custos associados. Assim, a esta proposta está adjacente um potêncial de melhoria que excede a análise realizada neste estudo. No entanto, uma vez que o estudo foi conduzido visando a determinação de um valor máximo de investimento para que o PRI simples não excedesse os 5 anos, em vez de ter sido analisado uma proposta em concreto, não é possível estabelecer com exactidão a posição deste projecto na hierarquia de prioridades.

Finalmente, algumas destas medidas podem ser consideradas em conjunto, pelo que faz sentido analisar os **efeitos conjuntos das soluções apresentadas**, de modo a obter uma visão global do impacte deste estudo na unidade industrial. Para esse efeito, foi necessário ter em consideração os impactes individuais de cada proposta no consumo energético e na cadência de produção da fábrica, mas também a relação entre os impactes das várias soluções apresentadas, já que, se for adoptado um dos cenários propostos, que implique a alteração do tempo de ciclo, as fracções de carga dos diversos equipamentos irão ser alteradas e consequentemente, a distribuição energética por equipamento será diferente, alterando o impacte energético de cada cenário proposto.

Assim, o primeiro passo consistiu na estimativa da cadência de produção resultante da aplicação simultânea das diferentes propostas (Apenas os cenários C e E influenciam este parâmetro). Através da cadência de produção é possível estimar o tempo de ciclo, conforme apresentado na expressão (3.4). Considerando que todas as melhorias propostas são implementadas, o tempo de ciclo reduz-se em 33 segundos, passando a 05:00 minutos, o que equivale a uma cadência de produção de 26,4 [ton/h]. Por sua vez, à cadência de produção mencionada, correspondem as fracções de tempo em carga médias presentes na Tabela 4.14 (os valores apresentados incluem a redução do tempo em carga dos mecanismos de doseamento substituídos no cenário C).

Tabela 4.14 - Fracções de Tempo em Carga Resultantes da Aplicação Conjunta dos Cenários Propostos

Tipologia de Equipamento	Fracção de Tempo em Carga
Elevadores de Alcatruzes	67%
Transportadores *Redler*	65%
Ventiladores	69%
Blowers	17%
Moinhos	69%
Outros	61%
Misturadoras	52%
Compressor	63%

Com base nas novas fracções de tempo em carga, recalculou-se a energia média consumida por cada equipamento, em cada um dos regimes, recorrendo ao método descrito na secção 3.1.2. Obteve-se assim a distribuição de consumo energético por equipamento correspondente à nova cadência de produção. Com base no novo perfil de consumo e novas

fracções de tempo de funcionamento em carga, estimaram-se impactes energéticos dos diferentes cenários. De realçar que no caso das propostas A e B prevêm-se, à partida, benefícios menores, já que se está a considerar uma projecção em que as fracções de tempo em carga são superiores. Por último, os impactes energéticos são utilizados directamente para estimar os impactes ambientais e em conjunto com os impactes productivos para a estimativa dos benefícios económicos.

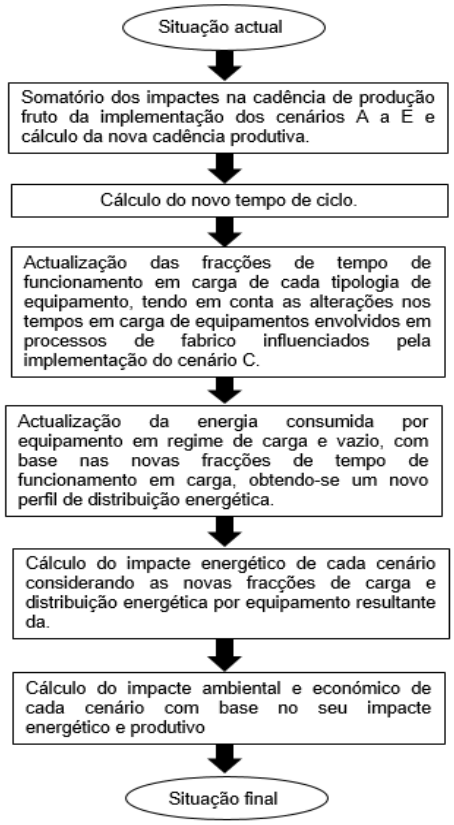


Figura 4.6 – Sistematização da metodologia utilizada na avaliação conjunta dos cenários A a D

A única excepção a este procedimento de cálculo é a integração dos impactes do cenário D, visto que se considerou que não existe qualquer variação no consumo específico, já que a única alteração reside na fonte energética utilizada. A redução do custo específico causada por esta proposta foi estimada pelo quociente entre os ganhos económicos anuais previstos e os gastos energéticos totais de 2016.

É ainda importante referir que todos os impactes foram estimados numa base anual tendo em conta que o tempo de funcionamento total da unidade industrial no ano transacto se mantém. Os impactes calculados para os índices de desempenho energético específico são apresentados na Tabela 4.15

Tabela 4.15 - Índices de Desempenho Energético Específico Resultantes da Aplicação Conjunta dos Cenários Propostos

Proposta de Melhoria	Variação Consumo Energético Anual [kWh]	Variação Emissões Anuais [$kgCO_2$]	Aumento Produção Anual [ton]	Decréscimo Consumo Específico	Decréscimo Custo Específico
A	-37059	-14156	-	4,3%	4,3%
B	-20195	-7714	-	2,3%	2,3%
C	+14443	+5517	5136	4,7%	4,7%
D	-68002	-25977	-	-	12,5%
E	+9440	+3606	2941	2,6%	2,6%
Total	-101372	-38724	8077	13,9%	25,1%

Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentados os mesmos dados sob a forma de gráficos de barras, para uma melhor percepção da magnitude dos impactes no paradigma energético actual da fábrica.

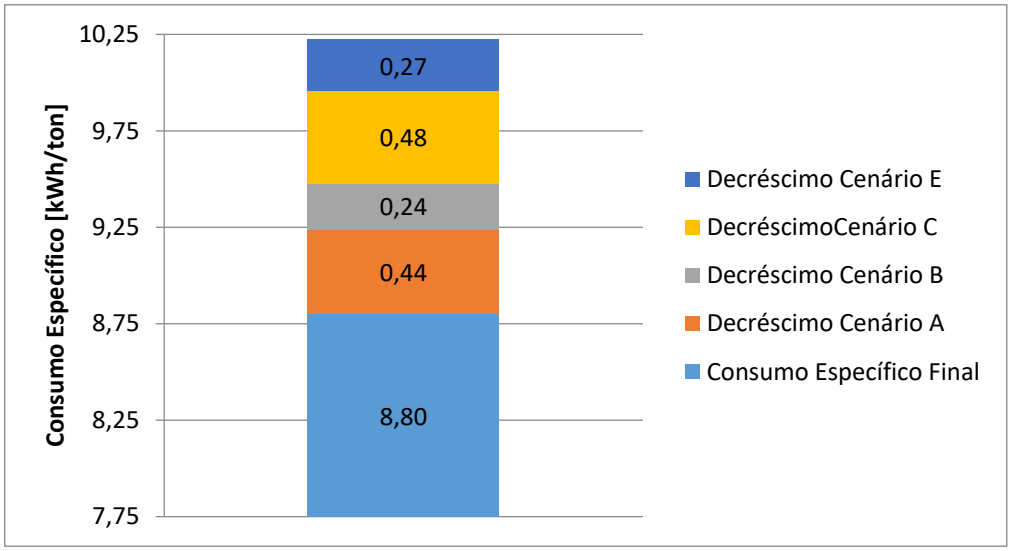


Figura 4.7 – Impacte Global dos Cenários Propostos no Consumo Específico

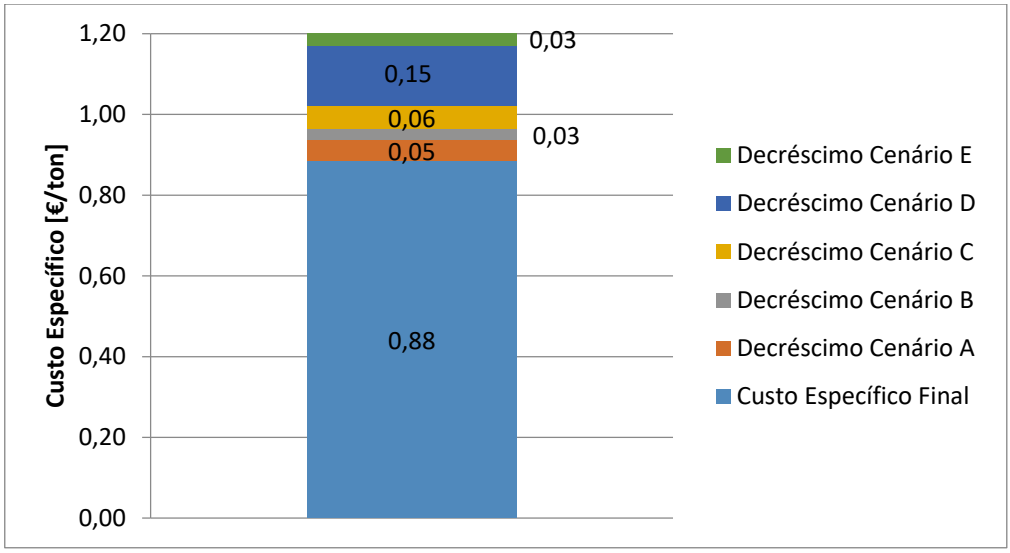


Figura 4.8 - Impacte Global dos Cenários Propostos no Custo Específico

Na Tabela 4.16, apresenta-se a síntese dos parâmetros financeiros de avaliação de investimentos resultantes da aplicação da totalidade das medidas sugeridas.

Tabela 4.16 - Parâmetros Financeiros Resultantes da Aplicação Conjunta dos Cenários Propostos

Proposta de Melhoria	Ganho Económico Anual [€]	Investimento Inicial [€]	PRI Simples [anos]
A	4359	23075	5,3
B	2375	7800	3,3
C	23979	119897	5,0
D	13572	77700	5,7

E	13597	200	0,0
Total	57883	228672	4,0

Tendo em conta a filosofia de melhoria contínua que caracteriza a Cooperativa Porto Alto – Rações para Animais, C.R.L, analisou-se ainda a viabilidade das soluções cujos impactes energéticos resultam directamente da existência de fracções de tempo em carga reduzidas (Instalação de VEV's), para cadências de produção mais elevadas, a atingir no futuro. Parte das cadências de produção consideradas resultam das reduções nos tempos de ciclo provocadas pelas propostas apresentas, as restantes são as que se obtêm, caso existam melhorias nos tempos de processamento dos dois processos que se seguem ao doseamento como os mais demorados: "moagem" e "transporte para a moagem", até que o tempo de ciclo seja limitado pelo transporte para os silos de expedição (actualmente demora 3 minutos e 17 segundos, o que corresponde a uma cadência de produção de 27,4 [ton/h]). Os resultados deste estudo constam nas Figuras 4.9 e 4.10.

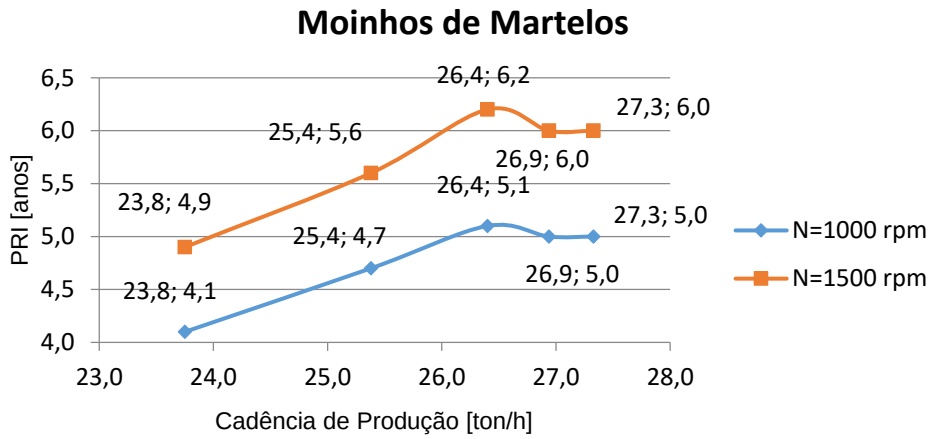


Figura 4.9 - Evolução do PRI com o Aumento da Cadência de Produção (VEV's Moinhos de Martelos). Os pontos apresentados estão identificados através da nomenclatura (xx,yy), em que "xx" corresponde à cadência de produção e "yy" se refere ao PRI.

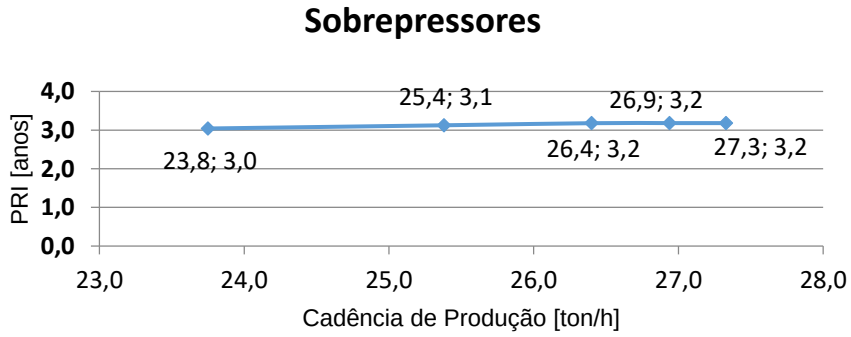


Figura 4.10 - Evolução do PRI com o Aumento da Cadência de Produção (VEV's Blowers). Os pontos apresentados estão identificados através da nomenclatura (xx,yy), em que "xx" corresponde à cadência de produção e "yy" se refere ao PRI.

Da análise da Figura 4.9 conclui-se que, caso os Moinhos de Martelos operem em vazio a uma velocidade de 1000 rpm, o PRI é inferior a 5 anos para a maioria das cadências de produção consideradas. A única excepção é o ponto de 26,4 [ton/h] para a qual o PRI é máximo. Para se atingirem cadências de produção superiores através da melhoria tecnológica é necessário diminuir o tempo de moagem e, consequentemente, aumentar fracção de tempo de

funcionamento em vazio dos moinhos, rentabilizando a utilização de VEV's capazes de reduzir o seu consumo em vazio através do decréscimo da velocidade de rotação.

Por outro lado, para a velocidade de operação em vazio de 1500rpm, o PRI só é inferior ao valor de referência para a cadência de produção correspondente à situação actual (23,8 [ton/h]), ou seja, caso se implemente o cenário A e, em simultâneo, alguma das medidas propostas que levam à diminuição do tempo de ciclo (C ou E), o período de retorno do investimento nos variadores será superior a 5 anos.

Analisando a Figura 4.10, verifica-se que o PRI proposta B é pouco sensível ao aumento da cadência de produção, sendo sempre da ordem dos 2 anos. Este fenómeno verifica-se pois o tempo de funcionamento em carga destes equipamentos é bastante reduzido, o que leva a fracções de tempo em carga baixas (inferiores a 20%) independentemente da cadência de produção considerada. Deste modo, considerando como critério de viabilidade, um PRI inferior a 5 anos, esta é sempre uma proposta de valor.

5. Conclusões e Trabalho Futuro

A eficiência energética no sector industrial é um indicador cada vez mais enfatizado pela gestão das unidades industriais. Contudo, em unidades industriais cujos processos apresentam menor densidade energética, como é o caso da produção de alimentos compostos para animais, este paradigma é recente, pelo que existe ainda uma vasta margem de melhoria. Verifica-se ainda que uma fracção significativa da margem de melhoria existente não está directamente relacionada com a eficiência tecnológica, mas sim com a eficiência operacional, pelo que a adopção de medidas de optimização operacional deve ser encarada como prioritária, já que apresenta, tipicamente, valores de investimento inicial reduzidos, conduzindo a PRI's diminutos.Durante o desenvolvimento da presente dissertação foi possível aferir um conjunto de conclusões relativas ao caso concreto do desempenho energético e productivo da unidade industrial de produção de rações pertencente à Cooperativa Porto Alto – rações para animais, C.R.L. tornando possível a quantificação de impactes de cinco cenários de melhoria e ainda a sugestão de outras medidas a adoptar no sentido de dar seguimento a este estudo.

Em relação à performance actual, verifica-se que o processo limitante da cadência de produção é o doseamento da matéria-prima, demorando, em média, 3 minutos e 48 segundos a processar cada ciclo de aproximadamente 2200 kg. Os maiores consumidores da instalação são os moinhos de martelos, responsáveis por cerca de metade da energia utilizada globalmente. É ainda importante salientar que o cosumo energético é bastante sensível à variação das fracções de tempo em carga de cada equipamento, isto é, a percentagem do seu tempo total de funcionamento em que estes se encontram a processar material.

Um dos principais problemas identificados foi o elevado desperdício energético associado a períodos de funcionamento em vazio, especialmente no caso de máquinas com elevada potência e funcionamento praticamente ininterrupto durante os horários de fabrico, tais como os moinhos de martelos e os sobrepressores. Verifica-se ainda que existem factores operacionais responsáveis pelo decréscimo da cadência de produção, nomeadamente um conjunto de falhas de origem humana no processo de doseamento que são directamente responsáveis por uma perda de aproximadamente 4%, ou 0,9 toneladas por hora na cadência productiva.

Tendo como base a modelação do consumo energético realizado para a situação actual da unidade fabril, elaboraram-se cinco cenários de melhoria: a instalação de VEV's nos moinhos de martelos (A) e nos sobrepressores (B), a substituição do sistema de doseamento do milho (C), a implementação de uma UPAC de energia fotovoltaica (D) e um plano para a eliminação dos imprevistos operacionais no doseamento (E).

Estudaram-se os impactes da implementação das propostas A e B, concluindo-se que estas alterações têm um potêncial de redução do consumo energético de até 46,8 MWh e 21,1 MWh anuais, o que se traduz num decréscimo das emissões de gases com efeito de estufa em 14,2 e 7,7 toneladas e em poupanças da ordem dos 5500€ e 2500€ respectivamente.

Analisaram-se os efeitos da aplicação do cenário C, de modo a reduzir o tempo de processamento da etapa de doseamento em 31 segundos, o que se traduz num ganho anual de 24000€ fruto de um incremento productivo de de 5136 toneladas (6,9%) com um incremento energético de 14,4 MWh e correspondente aumento das emissões de GEE em 5,5 toneladas.

No que diz respeito ao cenário D, quantificaram-se as repercussões da implementação de uma unidade de produção de energia para efeitos de autoconsumo com recurso a energia solar fotovoltaica, verificando-se que no caso de se optar por uma potência de 58kWp produzir-se-iam 87,5 MWh anuais dos quais 78% seriam utilizados para autoconsumo e 22% seriam vendidos à rede, perfazendo um ganho total anual de 13572€ e reduzindo as emissões de gases com efeito de estufa em 26 toneladas de CO_{2eq}.

A proposta E proporciona o aumento da produção anual em 2941 toneladas (3,9%) com um acréscimo de 9,4 MWh no consumo energético e correspondente aumento das emissões de GEE em 3,6 toneladas de CO_{2eq}, tendo um potencial para gerar um ganho anual de aproximadamente 13600€.

Tendo em vista a minimização do PRI, a prioridade passa pela adopção do plano de eliminação dos desperdícios operacionais durante o doseamento, já que esta medida apresenta

um investimento inicial praticamente nulo. Seguidamente priorizam-se as instalações de VEV's nos moinhos de martelos e sobrepressores, que permitem a recuperação do investimento em 3,3 e 4,3 anos, respectivamente. A implementação da UPAC fotovoltaica deve ser encarada como um investimento de valor, já que o seu VAL é de 163000€, embora este tenha de ser encarado como um projecto com um horizonte temporal mais alarado, visto que apresenta um PRI de 7 anos. Finalmente, recomenda-se que se substitua o sistema de doseamento do milho de modo a que sejam reduzidos pelo menos 31 segundos neste processo, desde que o investimento inicial não exceda os 120000€.

Se implementados em conjunto, os cenários de melhoria propostos permitem um decréscimo anual de 101,4 MWh e 38,7 tonCO_{2eq} enquanto possibilitam um aumento da produção anual em 8077 toneladas, diminuindo assim o consumo específico da unidade industrial em 13,9% e o custo específico da ração em 25,1%.

Finalmente, espera-se que o estudo e implementação de soluções mais eficientes prossiga numa óptica de melhoria contínua, deixando-se um conjunto de sugestões de **trabalho futuro** a realizar neste sentido.

Uma vez que está em curso o processo de implementação de um sistema de monitorização de consumo energético, sugere-se que sejam elaborados indicadores dinâmicos do consumo médio e instantâneo de cada processo e equipamento, para consulta em tempo real por parte do operador da sala de comando, conferindo ao mesmo uma maior sensibilidade no que concerne ao efeito de pequenas acções do quotidiano no desempenho energético da fábrica. Estes dados poderiam ainda, ser utilizados pela gestão para efeitos de quantificação de impactes energéticos e financeiros das alterações súbitas no plano de produção, tornando-se numa importante ferramenta de auxílio na tomada de decisão em relação à aceitação ou recusa de encomendas com um prazo de entrega inferior a um dado período temporal.

Recomenda-se ainda que seja realizado um estudo de impactes da substituição dos moinhos de martelos existentes, por *multicrackers*, cujo consumo específio é cerca de 75% inferior, sabendo à partida que este investimento terá um custo inicial bastante elevado.

Aconselha-se também que se efectue uma análise mais refinada da potência pico a instar na UPAC fotovoltaica, uma vez que as potências analisadas resultaram apenas das consulta da curva de carga diária da instalação fabril.

Sugere-se ainda que se faça uma inspecção às fugas de ar no circuito de ar comprimido e, caso seja necessário, se elabore uma ordem de manutanção correctiva, já que o ar comprimido representa actualmente cerca de 17% do consumo total da fábrica.

Por último, recomenda-se a quantificação do desempenho dos operadores da sala de comando, através de métricas como a cadência productiva média no seu turno, se disponibilizem estes indicadores aos mesmos e se estabeleçam metas a atingir e respectivos incentivos salariais, estimulando um espírito de constante desenvolvimento.

6. Bibliografia

1. **United Nations** (2015)**,** "Background on the UNFCCC: The international response to climate change". Disponível em : ttp://unfccc.int/essential_background/bare_essentials/items/6145.php (data de consulta: 18/08/2017).

2. **European Environmental Agency** (2016), "Overall Progress Towards the European Union's "20-20-20 - Climate and energy Targets".

3. **Agência Portuguesa do Ambiente** (2016), "Relatório do Estado do Ambiente Portugal" .

4. **International Energy Agency** (2007)**,** "Energy Use in the New Millennium".

5. **European Environmental Agency** (2010), " Final Energy Consumption by Sector". Disponível em: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-5/assessment (data de consulta: 16/08/2017).

6. **Carbon Trust** (2010)**,** "Industrial Energy Efficiency Accelerator - Guide to the Animal Feed Milling Sector".

7. **Gembicki, Jacek** (2016), "Energy efficiency in the agricultural and food industry illustrated with the example of the feed production plant".

8. **J. Serrano, L. Almeida** (1991)**,** "A Fábrica de Rações", Instituto Politécnico de Castelo Branco, 1ª Edição.

9. **C. Vigneault** (1993)**,** "Hammer mill grinding rate and energy requirements for thin and conventional hammers"**,** Agriculture Canada Research Station.

10. **Venkata S.P, Bitra.** (2009)**, "**Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions" , Powder Technology, pp. 32-45.

11. **M.S. El Shal,** (2010)**, "**Study the effect of some operational factors on hammer mill", Farm Machinery and power, pp. 54-74.

12. **A.T. de Almeida, F. Ferreira, D. Both** (2005)**, "**Technical and Economical Data Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electrical Motor Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41.

13. **A.T. de Almeida, F. Ferreira, P. Fonseca** (2001)**,** "VSD's for Electric Motor Systems", European Comission - DGTREN, SAVE II Programme 2000.

14. **A.T. de Almeida, F. Ferreira, D. Both** (2000)**,** "Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives", Save II Programme 2000 - University of Coimbra/ EU Directorate-General for Transport and Energy.

15. **M. Aerzener G. Fabrik** (2009), Manual de Operação e Instalação Sobrepressor de Êmbolos Rotativos.

16. **KWS** (2016), "Screw Conveyor - Engineering Guide".

17. **O. Onu, N. Nwakuba, C. Nwachukwu** (2010)**, "**Determination of Friction Coefficients of Shelled Peanuts, Corn and Mellon Seeds", Agricultural and Bioresources Engineering Department - Michael Okpara University of Agriculture.

18. **F. Cucchiella, I. D'Adamo and P. Rosa.** (2015), "Industrial Photovoltaic Systems: An Economic Analysis in Non-Subsidized Electricity Markets", Energies, Vol. 8, pp. 12866-12880.

19. **P. Oliveira** (2017)**, "**Autoconsumo Fotovoltaico, análise de um caso de estudo em termos de poupança e de rentabilidade", Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa.

20. **T. Costa** (2016), "Estudo de Sistemas de Produção Fotovoltaica para Autoconsumo de uma Biorrefinaria", Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto.

21. **Direcção Geral de Energia e Geologia** (2013), "Despacho nº15793-D/2013", Diário da República, Vol. 234.

22. **A. Fitzgerald, C. Kingsley, S. Umans** (2003), "Electric Machinery", McGraw-Hill, 6ª Edição.

23. **P. Peças E.Henriques** (2008), "Gestão da Produção", Secção de Folhas, 1ª Edição.

24. **D. Zhu, J. Wang, Q. Wang** (2015), "On the Stribeck Curves for Lubricated Counterformal Contacts of Rough Surfaces", J. Tribol, Vol. 137.

25. **J. Lopes** (2003), "Motores de Combustão Interna", Secção de Folhas, 1ª Edição.

26. **C. Tuthill** (2010), "CP 5009 Tri-Lobe Blower Pressure Curve".

27. **D. Fiscus, G.Foster, H. Kaufmann** (1971), "Grain-Stream Velocity Measurements", Transactions of the ASAE, pp. 162-166.

28. **D. Goswami** (2015), **"**Principles of Solar Engineering", CRC Press, 3ª Edição.

29. **GreenPRO** (2004), "Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação".

30. **R. Amaro** (2015), "Estudo da Incorporação de Energias Renováveis nos Campi do IST: Alameda e TagusPark", Instituto Superior Técnico.

31. **SOLARWORLD** (2017)**,** "Sunmodule Plus SW290/300 Mono - Data Sheet", Disponível em: http://www.solarworld.de/fileadmin/downloads_new/produkt/sunmodule/datenblaetter/en/mono/sw_sunmodule_plus_290-300_mono_5bb_blackframe_en.pdf (data de consulta: 24/05/2017).

32. **R. Castro** (2011), "Uma Introdução às Energias Renováveis", ISTPRESS, 2ª Edição.

33. **J. Meredith, S. Mantel, O. Wiley** (2009), "Project Management, a Managerial Approach", John Wiley & Sons, Inc., 7ª Edição**.**

34. **David Gorton** (2016)**,** " A Guide on the Risk-Adjusted Discount Rate", Disponível em: http://www.investopedia.com/articles/budgeting-savings/083116/guide-riskadjusted-discount-rate.asp (data de consulta: 01/08/2017).

35. **Allen-Bradley (**2013)**,** "Inversores PowerFlex® série 753 - Data Sheet".

36. **A. Martins** (2010), "Método Alternativo para a Estimação do Capital Próprio - Aplicação Prática aos Indicadores de Criação de Valor", Dos Algarves, Vol.19.

37. **Allen-Bradley** (2016), "PowerFlex 520-Series Adjustable Frequency AC Drive - Data Sheet".

38. **WEG** (2016), "EU MEPS - Requisitos de Eficiência Energética para Motores de Baixa Tensão".

39. **Bühler** (2013), "Chain Catalog".

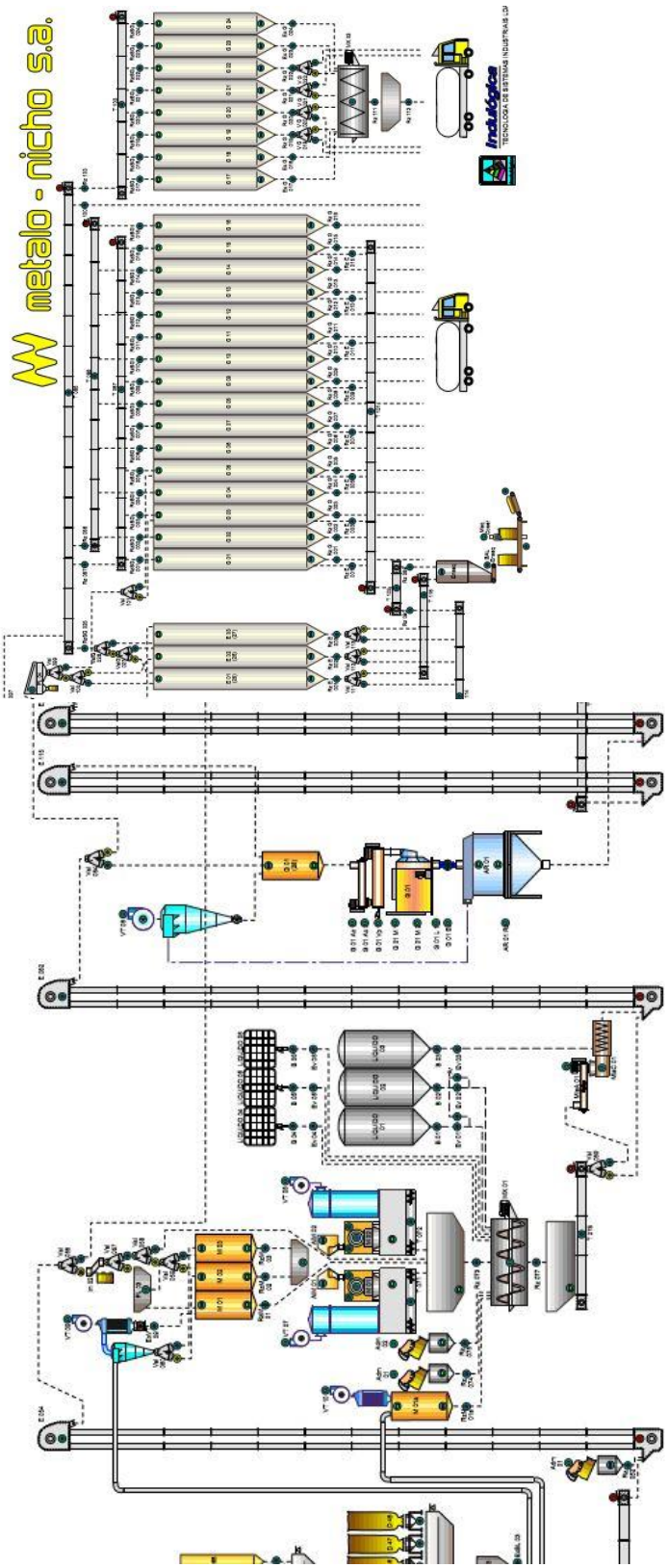
40. **Webster** (2016), "Webster Master Catalog".

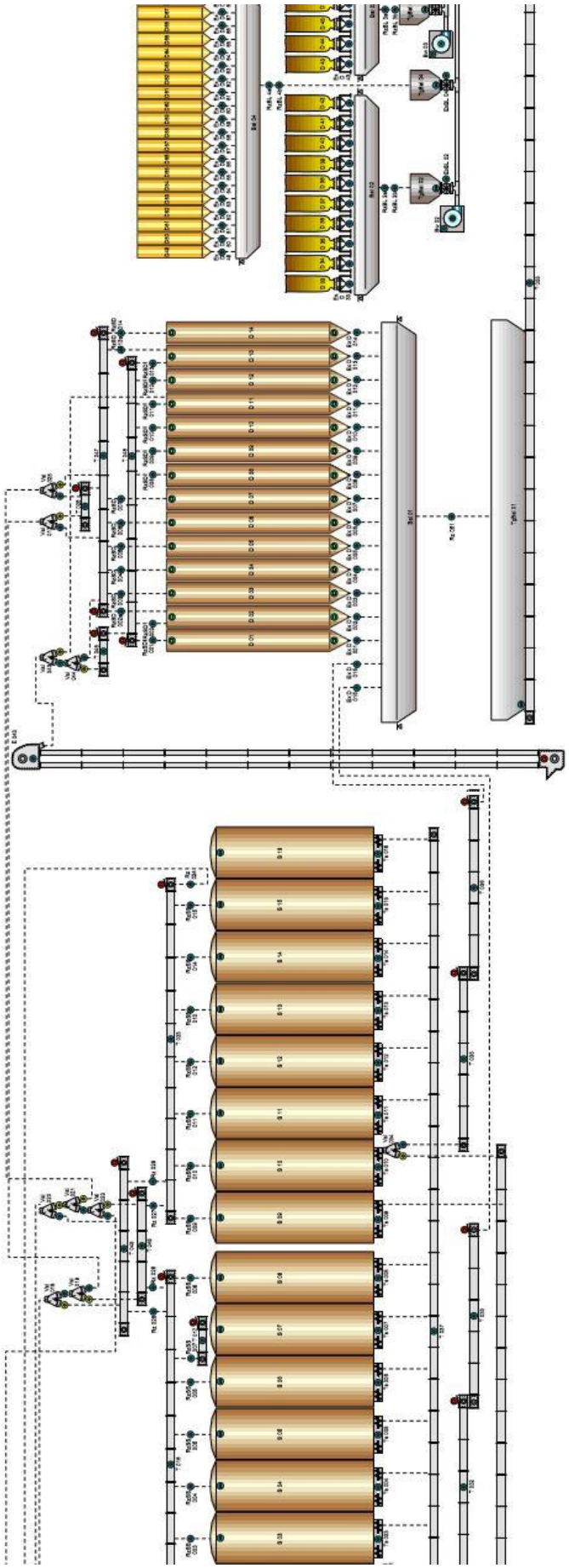
41. **Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia** (2014), "Decreto-Lei nº153/2014", Diário da República, Vol. 202.

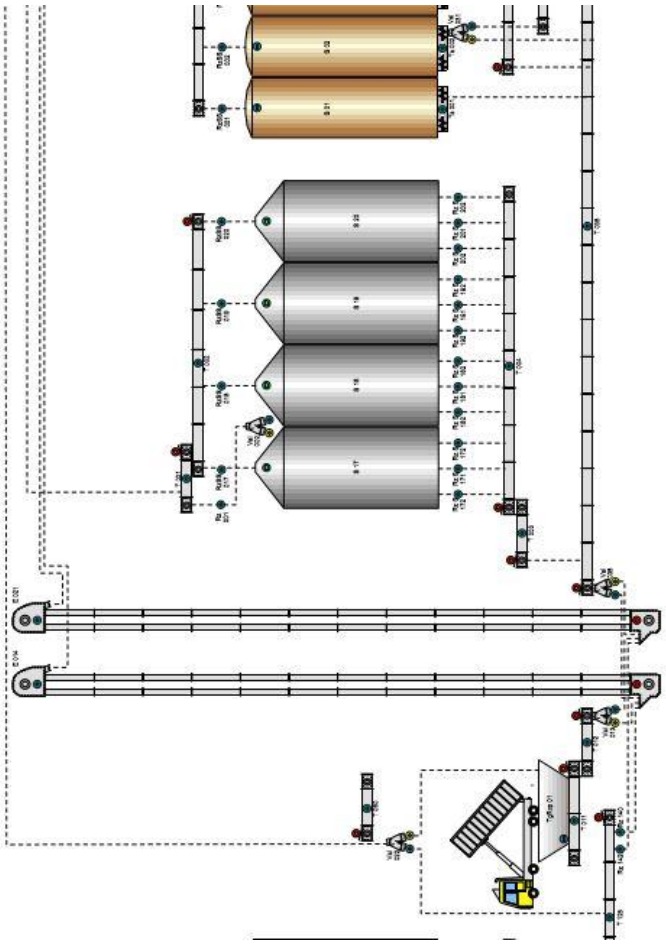
42. **A.T. de Almeida, F. Ferreira, D. Both** (1996), "Actions to promote energy-efficient electric motors", DGXVII. Brussels : DG-TREN - European Commission.

7. Anexos

A. Diagrama de Processo da Unidade Fabril em Estudo







B. Distribuição dos Equipamentos por Processo Utilizada no Modelação do Consumo Energético

i) Distribuição por Processo dos Equipamentos Pertencentes à Zona da Recepção

Código	Componente	Operação	Potência Nominal
T011	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	7,5
T012	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	2,2
T001	Transportador Redler	Armazenamento Primário	4,0
T002	Transportador Redler	Armazenamento Primário	5,5
E014	Elevador de Alcatruzes	Armazenamento a Granel MP	7,5
E021	Elevador de Alcatruzes	Armazenamento a Granel MP	15,0
T048	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	4,0
T049	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	4,0
T016	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	7,5
T017	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	3,0
T023	Transportador Redler	Armazenamento a Granel MP	7,5

ii) Distribuição por Processo dos Equipamentos Pertencentes à Zona do Fabrico

Código	Componente	Operação	Potência Nominal
Ts1	Transportador sem fim	Doseamento	4,0
Ts2	Transportador sem fim	Doseamento	11,0
Ts3	Transportador sem fim	Doseamento	4,0
Ts4	Raseira	Doseamento	2,2
Ts5	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ts6	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ts7	Raseira	Doseamento	3,0
Ts8	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ts9	Raseira	Doseamento	3,0
Ts10	Transportador sem fim	Doseamento	11,0
Ts11	Raseira	Doseamento	4,0
Ts12	Transportador sem fim	Doseamento	2,2
Ts13	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ts14	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ts15	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
T037	Transportador Redler	Doseamento	4,0
T032	Transportador Redler	Doseamento	2,2
T033	Transportador Redler	Doseamento	2,2
T035	Transportador Redler	Doseamento	3,0
T036	Transportador Redler	Doseamento	3,0
T038	Transportador Redler	Doseamento	4,0
T042	Transportador Redler	Doseamento	5,5

Vt 05	Ventilador	Doseamento	3,0
E043	Elevador de Alcatruzes	Doseamento	3,0
T026	Transportador Redler	Doseamento	2,2
T045	Transportador Redler	Doseamento	2,2
T047	Transportador Redler	Doseamento	2,2
T046	Transportador Redler	Doseamento	2,2
Ex D 001	Transportador sem fim	Doseamento	4,0
Ex D 002	Transportador sem fim	Doseamento	4,0
Ex D 003	Transportador sem fim	Doseamento	4,0
Ex D 005	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ex D 006	Transportador sem fim	Doseamento	2,2
Ex D 008	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ex D 010	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ex D 012	Transportador sem fim	Doseamento	4,0
Ex D 013	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ex D 014	Transportador sem fim	Doseamento	3,0
Ex D 033	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 034	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 035	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 036	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 037	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 038	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 039	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 040	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 041	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 042	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 043	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 044	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 045	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 046	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 047	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 048	Transportador sem fim	Doseamento	1,1
Ex D 049	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 050	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 051	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 052	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 053	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 054	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 055	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 056	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 057	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 058	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 059	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 060	Transportador sem fim	Doseamento	0,4

Ex D 061	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 062	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 063	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 064	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 065	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 066	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 067	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
Ex D 068	Transportador sem fim	Doseamento	0,4
T053	Transportador Redler	Moagem	3,0
ExBL 02	Eclusa	Mistura	1,1
ExBL 03	Eclusa	Moagem	1,1
ExBL 04	Eclusa	Mistura	1,1
Bw 02	Blower	Mistura	22,0
Bw 03	Blower	Moagem	22,0
E054	Elevador de Alcatruzes	Moagem	5,5
IM01	Íman	Separação	2,2
VT09	Ventilador	Moagem	1,1
ExVT09	Eclusa	Moagem	0,4
PL03	Peneiro	Separação	2,2
ALM1	Alimetador Moinho Variador	Moagem	0,8
ALM2	Alimetador Moinho Variador	Moagem	0,8
M01	Moinho de Martelos	Moagem	110,0
M02	Moinho de Martelos	Moagem	110,0
VT10	Ventilador	Mistura	1,1
VT07	Ventilador	Moagem	7,5
VT08	Ventilador	Moagem	7,5
T071	Transportador Redler	Mistura	1,5
T072	Transportador Redler	Mistura	1,5
ExM1	Eclusa	Mistura	2,2
MX01	Misturadora Nova	Mistura	37,0
T078	Transportador Redler	Armazenamento a Granel PF	2,2
B01	Bomba Óleo	Mistura	2,2
B02	Bomba Melaço	Adição de Melaço	2,2
B03	Bomba Banha	Mistura	2,2
MlaA01	Alimentador Melaçadora	Adição de Melaço	3,0
MlaC 01	Melaçadora	Adição de Melaço	18,5
E082	Elevador de Alcatruzes	Armazenamento a Granel PF	7,5
ALG01	Alimentador Granuladora Variador	Granulação	0,4
ALG02	Alimentador Granuladora	Granulação	5,5
G 01	Granuladora	Granulação	55,0

AR 01	Arrefecedor de Granulados	Granulação	0,5
PL05	Peneiro de Granulados	Separação	1,1
VT 06	Ventilador	Granulação	7,5
Ex G01	Eclusa	Granulação	1,1
E115	Elevador de Alcatruzes	Ensaque	2,2
E097	Elevador de Alcatruzes	Ensaque	3,0
T085	Transportador Redler	Armazenamento a Granel PF	3,0
T086	Transportador Redler	Armazenamento a Granel PF	3,0
T087	Transportador Redler	Armazenamento a Granel PF	3,0
T103	Transportador Redler	Adição e Expedição de Medicamentosas	2,2
PL04	Peneiro de Granulados	Separação	2,2

iii) Distribuição por Processo dos Equipamentos Pertencentes à Zona da Expedição

Código	Componente	Operação	Potência Nominal
T114	Transportador Redler	Ensaque	1,10
T116	Transportador Redler	Ensaque	1,10
T102	Transportador Redler	Ensaque	1,50
Ensaq	2 tapetes Ensacamento	Ensaque	2,20
T101	Transportador Redler	Ensaque	4,00
Ex G 017	Eclusa	Adição e Expedição de Medicamentosas	3,00
Ex G 018	Eclusa	Adição e Expedição de Medicamentosas	3,00
Ex G 023	Eclusa	Adição e Expedição de Medicamentosas	3,00
Ex G 024	Eclusa	Adição e Expedição de Medicamentosas	3,00
MX 02	Misturadora Medicamentosas	Adição e Expedição de Medicamentosas	37,00

Comp	Compressor	Ar Comprimido	30,00

C. Distribuição de Consumos Relativos e Absolutos

i) Distribuição dos Consumos Relativos e Absolutos por Tipologia de Equipamento

Tipologia de Equipamento	Potência		Energia [kWh]		Energia		Energia [kWh]		Energia	
	Potência Instalada [kW]	Potência Útil Média [kW]	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 3	Método 4
Elevadores de Alcatruzes	40	27	1493	3056	6,4%	6,7%	522	831	4,9%	4,0%
Transportadores Redler	105	102	2199	3169	9,5%	6,9%	1103	1610	10,3%	7,8%
Ventiladores	20	32	1353	1995	5,8%	4,4%	562	828	5,3%	4,0%
Outros	145	115	1016	1652	4,4%	3,6%	426	603	4,0%	2,9%
Blowers	44	9	2109	4627	9,1%	10,1%	823	1750	7,7%	8,5%
Moinhos	220	21	11329	25489	48,8%	55,8%	4699	10613	43,9%	51,6%
Misturadoras	74	73	789	2091	3,4%	4,6%	613	1939	5,7%	9,4%
Compressor	30	22	2943	3600	12,7%	7,9%	1962	2400	18,3%	11,7%
Total	678	380	23230	45678	100,0%	100,0%	10713	20575	100,0%	100,0%

ii) Distribuição dos Consumos Relativos e Absolutos por Processo

Processo	Potência		Energia [kWh]		Energia		Energia [kWh]		Energia	
	Potência Instalada [kW]	Potência Útil Média [kW]	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 3	Método 4
Armazenamento a Granel MP	58	27	1006	22901	4,3%	5,0%	474	763	4,4%	3,7%
Doseamento	159	102	995	1434	4,3%	3,1%	422	595	3,9%	2,9%
Mistura	72	32	2559	5184	11,0%	11,3%	1388	3068	13,0%	14,9%
Moagem	270	115	14334	30929	61,7%	67,7%	5903	12709	55,1%	61,8%
Armazenamento a Granel PF	19	9	1012	1668	4,4%	3,7%	412	686	3,8%	3,3%
Mistura e Expedição de Medicamentosas	51	21	307	341	1,3%	0,7%	115	248	1,1%	1,2%
Outros	17	73	74	231	0,3%	0,5%	34	107	0,3%	0,5%
Ar Comprimido	30	22	2943	3600	12,7%	7,9%	1962	2400	18,3%	11,7%
Total	678	380	23230	45678	100,0%	100,0%	10713	20575	100,0%	100,0%

iii) Distribuição dos Consumos Relativos e Absolutos por Zona Fabril

Fase	Potência		Energia [kWh]		Energia		Energia [kWh]		Energia	
	Potência Instalada [kW]	Potência Útil Média [kW]	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 3	Método 4
Recepção	68	27	1006	2291	4,3%	5,0%	474	763	4,4%	3,7%
Fabrico	522	329	19045	39536	82,0%	86,6%	8184	17195	76,4%	83,6%
Expedição	59	24	237	251	1,0%	0,5%	91	217	0,9%	1,1%
Ar Comprimido	30	25	2943	3600	12,7%	7,9%	1962	2400	18,3%	11,7%
Total	678	380	23230	45678	100,0%	100,0%	10713	20575	100,0%	100,0%

Legenda:

Método 1: Consumo energético baseado na potência activa durante a semana de maior produção.

Método 2: Consumo energético baseado na potência nominal durante a semana de maior produção.

Método 3: Consumo energético baseado na potência activa durante a semana de menor produção

Método 4: Consumo energético baseado na potência nominal durante a semana de menor produção

D. Exemplo de Tabela de Cálculo Utilizada no Cálculo do Excedente Energético Resultante da UPAC (Junho)

Hora	Irradiância [W/m²]	Produção Diária [kWh]				Consumo Diário [kWh]	Consumo Mensal Dias Úteis [KWh]	Excedente Dias Úteis [kWh]				Consumo Diário FDS [kWh]	Consumo Mensal FDS [kWh]	Excedente FDS [kWh]			
		50kW	58kW	100kW	200kW			50kW	58kW	100kW	200kW			50kW	58kW	100kW	200kW
6:00	0,0	3,7	4,3	7,5	14,9	27,5	577,5	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	90,0	0,0	0,0	0,0	44,3
7:00	0,0	10,5	12,2	21,1	42,0	213,3	4478,3	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	81,0	13,7	29,1	108,5	297,4
8:00	0,1	17,6	20,4	35,2	70,3	209,8	4404,8	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	95,4	121,0	253,8	569,7
9:00	0,1	22,5	26,2	45,0	90,0	133,5	2803,5	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	54,0	148,7	181,5	351,4	755,6
10:00	0,1	29,8	34,6	59,5	118,9	57,3	1202,3	0,0	0,0	48,0	1294,5	6,0	54,0	213,9	257,2	481,8	1016,0
11:00	0,1	31,8	36,9	63,6	127,0	48,0	1008,0	0,0	0,0	327,8	1659,6	7,0	63,0	223,2	269,5	509,5	1080,2
12:00	0,1	33,6	39,1	67,2	134,3	50,5	1060,5	0,0	0,0	351,4	1759,0	7,0	63,0	239,5	288,5	542,1	1145,3
13:00	0,1	27,7	32,1	55,3	110,5	185,8	3900,8	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	186,1	226,3	435,1	931,7
14:00	0,1	28,1	32,7	56,3	112,3	226,3	4751,3	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	81,0	172,1	213,1	425,3	930,0
15:00	0,1	27,9	32,4	55,8	111,4	204,5	4294,5	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	188,1	228,7	439,2	939,9
16:00	0,1	16,9	19,7	33,8	67,6	214,3	4499,3	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	89,3	113,9	241,6	545,2
17:00	0,0	10,1	11,8	20,3	40,5	165,8	3480,8	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	28,2	42,9	119,3	301,1
18:00	0,0	4,5	5,2	8,9	17,9	161,5	3391,5	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	0,0	0,0	17,5	97,7
19:00	0,0	0,2	0,3	0,5	0,9	212,0	4452,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	63,0	0,0	0,0	0,0	0,0

E. Respostas aos Pedidos de Cotação

Código de Artigo	Designação	Quantidade	Preço Unit.	%iva	Desc.	Total Ilíquido
ZZTXT	. EFETUAR MONTAGEM DE VARIADOR DE VELOCIADE EM ARMÁRIO A INSTALAR NA SALA DOS QUADROS PARA O MOINHO, CORREÇÃO DE CABLAGENS, ARRANQUE, CONFIGURAÇÕES E COLOCAÇÃO EM FUNCIONAMENTO	1,00	880,000	23,0		880,00
RA20F1ANC260JN0NN	PowerFlex 753 AC Drive, with Embedded I/O, Air Cooled, AC Input with Precharge, no DC Terminals, Open Type, 260 Amps, 132kW ND, 110kW HD, 400 VAC, 3 PH, Frame 6, Filtered, CM Jumper Installed, None, Blank (No HIM)	1,00	8 500,000	23,0		8 500,00
ZZTXT1	-	1,00	0,000	0,0		0,00
ZZNOTA	Nota: O EQUIPAMENTO TEM QUE SER MONTADO EM ARMÁRIO SEPARADO DOS EXISTENTES POR QUESTÕES DE DIMENSÕES	1,00	0,000	0,0		0,00

MOINHO

IBAN: PT50 0033 0000 00010591961 64 (BCP) ou IBAN: PT 50 0010 0000 36484920001 42 (BPI)

I.V.A.	Taxa 0%	Taxa 6,0%	Taxa 23,0%	Taxa 13,0%	Regime Especial
Incidência	0,00	0,00	9 380,00	0,00	0,00
Valor	0,00	0,00	2 157,40	0,00	0,00

Total Ilíquido	Desconto Produto	Desconto Fin.	Valor Liquido	Total IVA	Total do Documento
9 380,00	0,00	0,00	9 380,00	0,00	*** *** *11 537,40

i) Proposta para a instalação de um VEV num moinhos de martelos

Código de Artigo	Designação	Quantidade	Preço Unit.	%iva	Desc.	Total Iliquido
ZZTXT	Descrição: Fornecimento, montagem, ligações, configurações e colocação em funcionamento de um quadro de potência equipado com dois variadores de frequencia de 22KW (Blowers) a instalar junto ao existente fazendo parte do fornecimento:	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Quadro de potência com Variadores de Frequência de 22kW	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Alteração no quadro existente por forma a instalar a variação de velocidade	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Cabos de potencia a instalar entre os dois quadros	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Cabos de comando, controle e sinalização entre os dois quadros	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Montagem, parametrizações, ajustes, arranque e colocação em funcionamento	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Valor total dos trabalhos	1,00	7 800,000	23,0		7 800,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZPE	Prazo de Entrega: Três a quatro semanas após confirmação de encomenda	1,00	0,000	0,0		0,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZCPAG	Condições de Pagamento: 40% com a adjudicação + 60% com a conclusão dos trabalhos	1,00	0,000	0,0		0,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZNIB	Em caso de Adjudicação poderá efectuar Transferência para o IBAN: PT50 0033 0000 00010591961 64 (BCP) OU IBAN: PT50 0010 0000 36484920001 42 (BPI) enviando o comprovativo por Fax ou Por Email	1,00	0,000	0,0		0,00

PEDIDO POR ANDRÉ FERREIRA

IBAN: PT50 0033 0000 00010591961 64 (BCP) ou IBAN: PT 50 0010 0000 36484920001 42 (BPI)

I.V.A.	Taxa 0%	Taxa 6,0%	Taxa 23,0%	Taxa 13,0%	Regime Especial
Incidência	0,00	0,00	7 800,00	0,00	0,00
Valor	0,00	0,00	1 794,00	0,00	0,00

Total Ilíquido	Desconto Produto	Desconto Fin.	Valor Liquido	Total IVA	Total do Documento
7 800,00	0,00	0,00	7 800,00	0,00	*** *** **9 594,00

Extenso : nove milhares, quinhentos e noventa e quatro euros

ii) Proposta para a instalação de um VEV's nos sobrepressores

Código de Artigo	Designação	Quantidade	Preço Unit.	%iva	Desc.	Total Ilíquido
ZZTXT	Descrição: Fornecimento e montagem de Unidade de Produção Fotovoltaica UPAC de 58,00KWp composta por:	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: 200 Paineis Fotovoltaicos	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: 3 Inversores trifásicos 3PMPT de 20KW	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Estrutura metálica para suporte, fixação e montagem dos paineis	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Contador de leitura indireta	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Modem GSM + Cabos + Antena	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Quadro de Proteção AC	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Transformadores de Intensidade para medição	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: 3 Quadros DC 4IN_3OUT	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Cabos de alimentação até ao QGBT	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Proteções a instalar no QGBT	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Cabo PV Solar ZZ-F(AS) 0,6/1 1x6 PT	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Montagem e acessorios	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZTXT	Descrição: Valor Total da Proposta	1,00	77 700,000	23,0		77 700,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZNOTA	Nota: Não se inclui neste fornecimento qualquer tipo de trabalho de construção civil, abertura e tapamento de valas, taxa de registo e certificação	1,00	0,000	0,0		0,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZPE	Prazo de Entrega: Quatro a seis semanas após adjudicação	1,00	0,000	0,0		0,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZCPAG	Condições de Pagamento: 40% com a adjudicação + 40% com o inicio da montagem + 20% com a conclusão da montagem	1,00	0,000	0,0		0,00
ZZTXT1	E	1,00	0,000	23,0		0,00
ZZNOTA	Nota: O processo de registo no SERUP será tratado por nós sem qualquer custo adicional, sendo a taxa de registo liquidada por vós.(Com potência instalada de 5 kW a 100 kW - 250,00€ - Portaria 14/2015)	1,00	0,000	0,0		0,00

IBAN: PT50 0033 0000 00010591961 64 (BCP) ou IBAN: PT 50 0010 0000 36484920001 42 (BPI)

I.V.A.	Taxa 0%	Taxa 6,0%	Taxa 23,0%	Taxa 13,0%	Regime Especial
Incidência	0,00	0,00	77 700,00	0,00	0,00
Valor	0,00	0,00	17 871,00	0,00	0,00

Total Ilíquido	Desconto Produto	Desconto Fin.	Valor Liquido	Total IVA	Total do Documento
77 700,00	0,00	0,00	77 700,00	0,00	*** *** *95 571,00

Extenso : noventa e cinco milhares, quinhentos e setenta e um euros

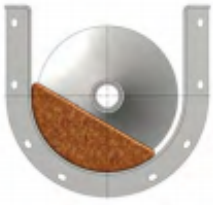
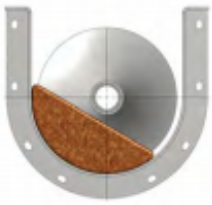
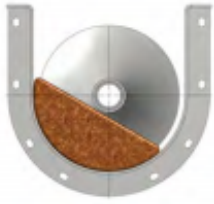
iv) Proposta de Implementação de uma UPAC fotovoltaica

F. Elementos de Consulta Utilizados no Dimensionamento de Transportadores de Parafuso

i) Factores de Capacidade (16)

Capacity Factors for Special Pitches		
Pitch	Description	Capacity Factor
Standard	Pitch = Diameter	1.00
Short	Pitch = 2/3 Diameter	1.50
Half	Pitch = 1/2 Diameter	2.00
Long	Pitch = 1-1/2 Diameters	0.67

ii) Tabela de Selecção de Diâmetro de Hélice em Função do Caudal de Projecto (16)

Capacity Table				
Trough Loading	Screw Dia. (in.)	Max. RPM *	Capacity in ft³/hr	
			At Max. RPM	At 1 RPM
15%	4	69	14.5	0.2
	6	60	45	0.8
	9	55	150	2.7
	12	50	323	6.5
	14	50	520	10.4
	16	45	702	15.6
	18	45	1,012	22.5
	20	40	1,248	31.2
	24	40	2,184	54.6
	30	35	3,728	106.5
	36	30	5,532	184.4
 30% A	4	139	57	0.4
	6	120	179	1.5
	9	100	545	5.5
	12	90	1,161	12.9
	14	85	1,768	20.8
	16	80	2,496	31.2
	18	75	3,375	45.0
	20	70	4,375	62.5
	24	65	7,085	109.0
	30	60	12,798	213.3
	36	50	18,440	368.8
 30% B	4	69	28	0.4
	6	60	90	1.5
	9	55	305	5.5
	12	50	645	12.9
	14	50	1,040	20.8
	16	45	1,404	31.2
	18	45	2,025	45.0
	20	40	2,500	62.5
	24	40	4,360	109.0
	30	35	7,465	213.3
	36	30	11,064	368.8
 45%	4	190	116	0.61
	6	165	368	2.2
	9	155	1,271	8.2
	12	145	2,813	19.4
	14	140	4,368	31.2
	16	130	6,071	46.7
	18	120	8,112	67.6
	20	110	10,307	93.7
	24	100	16,400	164.0
	30	90	28,800	320.0
	36	75	41,490	553.2

iii) Propriedades Físicas de Matérias-Primas (16)

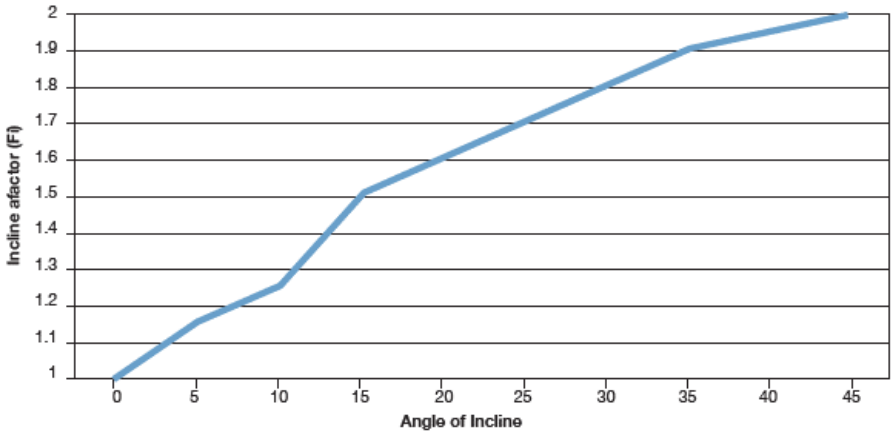
Bulk Material	Maximum Particle Size (in.)	Bulk Density (lbs/ft³)	% Trough Loading	Material Factor (MF)	Component /Bearing Series	Abrasive-ness	Corrosive-ness	Flowability	Special Notes
Coffee, Beans, Roasted	-1/2	20-30	45	0.4	A2	I	I	II	J, K
Coffee, Chaff	-1/8	20	45	1.0	A1-A2	I	I	II	G, Q
Coffee, Ground, Dry	-1/64	25	30A	0.6	A1-A2	I	I	III	J
Coffee, Ground, Wet	-1/64	35-45	30A	0.6	A1-A2	I	I	IV	P
Coffee, Soluble	-1/64	19	30A	0.4	A2	I	I	III	G,J,K,M,Q
Coke, Breeze	-1/2	25-35	15	1.2	C4	III	I	III	H, Q
Coke, Loose	-7	25-35	15	1.2	D4	III	I	III	H, K, N
Coke, Petrol, Calcined	-7	35-45	15	1.3	D4	III	I	III	N
Compost	-7	30-50	30A	1.0	C1-C2	I	II	IV	N, P, •
Concrete, Pre-Mix, Dry	-1/2	85-120	30B	3.0	C4	II	I	III	M
Copper Ore	+ 1/2	120-150	30B	4.0	D4	II	I	III	
Copper Ore, Crushed	+ 1/2	120-150	30B	4.0	C4	II	I	III	
Copper Sulfate (Bluestone)	-1/2	75-95	30A	1.0	B1-B2-B3	I	III	III	•
Copperas (Ferrous Sulfate)	-1/2	50-75	30A	1.0	B4	I	I	III	M
Copra, Cake, Ground	-1/8	40-45	30A	0.7	A1-A2-A3	I	I	IV	C, O
Copra, Cake, Lumpy	-3	25-30	30A	0.8	B1-B2-B3	I	I	III	C, O
Copra, Lumpy	+ 1/2	22	30A	1.0	B1-B2-B3	I	I	III	C, O
Copra, Meal	-1/8	40-45	30A	0.7	B4	I	I	III	C, O
Cork, Granulated	-1/2	12-15	30A	0.5	A1-A2-A3	I	I	III	D, V, Q
Cork, Ground	-1/8	5-15	30A	0.5	A1-A2-A3	I	I	III	D, V, Q
Corn, Cleanings	-1/8	20-30	30A	0.4	A1-A2-A3	I	I	III	J, Q
Corn, Cracked	-1/8	40-50	45	0.7	A1-A2-A3	I	I	II	H, J
Corn, Grits	-1/8	40-45	30A	0.5	A1-A2-A3	I	I	III	H, J
Corn, Seed	-1/2	45	45	0.4	A1-A2-A3	I	I	II	H, J, K
Corn, Steeped	-3	40-60	•	0.8	•	•	•	•	•
Corn, Shelled	-1/2	45	45	0.4	A1-A2-A3	I	I	II	H, V
Corn Cobs, Ground	-1/2	17	45	0.6	A1-A2-A3	I	I	II	H, Q
Corn Cobs, Whole	Irregular	12-15	30A	•	B1-B2	I	I	II	H, N, •
Corn Ear	-16	56	30A	•	B1-B2	I	I	III	H, N
Corn Fiber Feed	-1/8	15-35	30A	1.5	•	I	I	III	
Corn Fiber, Dewatered	-1/8	10-25	30A	0.6	A1-A2-A3	I	I	III	
Corn Fiber, Wet	-1/8	15-50	30A	0.8	A1-A2-A3	I	I	III	J, M
Corn Filter Aid	-1/8	15-50	15	2.5	C4	III	I	III	
Corn Germ	-1/8	21	30A	0.4	A1-A2-A3	I	I	III	H, J, O, Q

iv) Factores de Diâmetro (16)

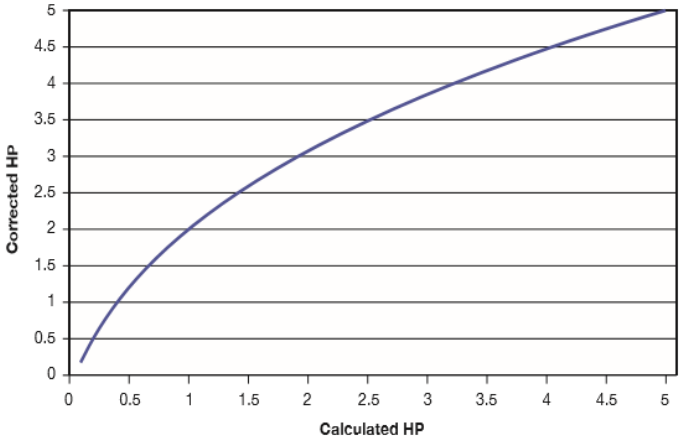
Diameter Factor Table (DF)	
Dia.	Factor
4	12
6	18
9	31
12	55
14	78
16	106
18	135
20	165
24	235
30	377
36	549

v1) Factores de Atrito para Diferentes Tipos de Rolamentos (16)

Hanger Bearing Factor Table (HBF)	
Bearing Type	Bearing Factor
Ball, Roller, or none	1.0
Bronze, or Wood	1.7
Plastic, Nylon, UHMW, or Teflon	2.0
Hard Iron, or Stellite	4.4



vi) Variação do Factor de Inclinação com a Inclinação de Transportadores de Parafuso (16)



vii) Evolução da Potência Corrigida em Função da Potência Calculada para Transportadores de Parafuso (P < 5Hp) (16)