



Aumento da Eficiência Energética no setor de Mistura

MIGUEL DE NORONHA CUNHA DE SANTIAGO SOTTOMAYOR

Julho de 2019

Aumento da Eficiência Energética no setor de Mistura

Julho 2019

AUTOR

Miguel Sottomayor, 1141130

ORIENTAÇÃO

Engenheiro Adriano Salgado Ribeiro – Continental Mabor

Engenheira Paula Neto – ISEP

CO-ORIENTAÇÃO

Engenheiro Simão Dias – Continental Mabor

Engenheira Anabela Guedes – ISEP

Dissertação Submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Química : Energia e Biorrefinaria

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível com a colaboração e apoio de algumas pessoas e entidades, às quais gostaria de prestar o meu reconhecimento.

Agradeço à Continental-Mabor S.A pela oportunidade de realizar esta dissertação.

Agradeço todo o apoio, disponibilidade e críticas construtivas por parte dos meus orientadores Eng. Adriano Salgado e Eng. Simão Dias, pela empresa, e Eng. Paula Neto e Eng. Anabela Guedes pelo ISEP.

A todos os elementos do DIP Materiais pela excelente integração, disponibilidade e partilha de conhecimentos sobre a empresa.

A todos os colaboradores da empresa pela simpatia demonstrada no decorrer desta dissertação.

A todos os meus amigos do DEQ/ISEP, em especial ao grupo VN: Amaro Cruz, Cristiano Silva, Daniela Borges, Eduardo Pinho, Luís Mendes, e Tiago Fernandes que me têm acompanhado ao longo de toda a minha vida académica, pela amizade e pelos grandes momentos proporcionados.

Ao Gilberto Pinto pela amizade e contribuição no meu crescimento pessoal como um “role model” a seguir em termos de conhecimento cultural e intelectual.

Aos meus pais, Sara e Afonso, por todos os valores que me transmitiram, por todo o incentivo que me deram ao longo da vida, por me demonstrarem que em tudo na vida é necessário esforço, trabalho e dedicação e por ser a pessoa que sou hoje.

Resumo

A presente dissertação teve como principal objetivo o aumento da eficiência energética do setor de Mistura, nomeadamente das Unidades de Controlo de Temperatura (TCUs) das linhas de mistura de matéria-prima, na empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A localizada em Lousado. Este sistema permite controlar a temperatura dos misturadores durante o processo de mistura, garantindo o correto desempenho das diferentes fases, e dos equipamentos de extrusão e de moinhos, de modo a controlar a aderência da borracha aos rolos durante o processo de calandragem.

Inicialmente efetuou-se um levantamento energético destas unidades e das condições operatórias atuais nas linhas #10 e #11. De seguida, conforme as condições verificadas, foram implementadas medidas de manutenção e otimização do funcionamento das TCUs, atuando especificamente nas válvulas de controlo, resistências de aquecimento e configurações do controlador PID.

Em termos de consumo energético, alcançou-se uma **poupança total anual de 40 711 €**, resultado de uma redução de **29 338 €** nas unidades da linha #10, e de uma diminuição de **11 373 €** na unidade da câmara inferior do misturador da linha #11. Concluiu-se também que, na situação de funcionamento otimizado, não existe alteração do consumo energético pela redução das temperaturas das correntes de recirculação do corpo e rotores dos misturadores #10 e #11.

A nível da mistura, na linha #10, o controlo do processo foi melhorado, pois ficou assegurado que as correntes atingem a temperatura especificada e não ocorre aquecimento nem arrefecimento indesejado.

Foi também concluído o trabalho de otimização das temperaturas de doseamento de matérias primas, iniciado pela Engenheira Anabela Guedes, obtendo-se uma **poupança anual de 1 792 €**.

Finalmente, é importante realçar o papel fundamental da monitorização do consumo energético das TCUs através da ferramenta *Messdas*, com a qual se consegue identificar e evitar situações de consumo excessivo de energia, como aconteceu no caso da linha #6, que apresentou uma despesa extra evitável de **6 489 €** num período de 2 meses.

Palavras-Chave: Indústria Automóvel, Processo de Mistura, Otimização Energética, Permutadores de calor.

Abstract

The following dissertation's main objective is to increase the energy efficiency of the Mixing area, namely the Temperature Control Units (TCUs) of the raw materials mixing line, at Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A located in Lousado. This system enables the control of the mixers' temperature during the mixing process, ensuring the correct performance at its different stages, and the control of the extrusion and mills' temperature, in order to regulate the adhesion of the rubber during the calendaring process.

Firstly, an assessment of the energy consumption of these units and of their current working conditions in the lines #10 and #11 was carried out. Then, in accordance with the conditions verified, measures were taken to repair and optimize their performance, acting specifically on the control valves, heat resistances and PID controller configurations.

In terms of energy consumption, a **total annual savings** of **40 711 €** was achieved, resulting from a reduction of **29 338 €** in line #10's units, and from a decrease of **11 373 €** in the lower chamber unit of line #11's mixer. It was concluded that, in an optimized performing situation, there is no change in energy consumption by reducing the recirculation streams' temperatures of the body and rotors of mixers #10 and #11.

As regards the mixing, in line #10, process control has been improved, as it has been ensured that the streams reach the specified temperature and no unwanted heating or cooling occurs.

The optimization work began by Engineer Anabela Guedes was also concluded, in respect of the raw material temperature dosing, and an **annual savings** of **1 792 €** was reached.

Finally, the fundamental role of monitoring the energy consumption of the TCUs through the Messdas tool, must be highlighted, through which it is possible to identify and avoid situations of excessive energy consumption, as was the case of line # 6, which reported an avoidable additional expense of **6 489 €** over a period of 2 months.

Keywords: *Automotive Industry, Mixing Process, Energy Optimization, Heat Exchangers.*

Índice Geral

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento da dissertação.....	1
1.2 História da empresa	1
1.3 Produto e processo de fabrico	3
1.3.1 Requisitos e funções básicas de um Pneu	3
1.3.2 O processo de fabrico do Pneu	4
1.4 Objetivos	8
1.5 Estrutura global.....	8
2. Revisão Bibliográfica.....	9
2.1 Processos de transferência de calor.....	9
2.1.1 Condução.....	10
2.1.2 Convecção	11
2.1.3 Radiação	12
2.1.4 Condução e Convecção Combinadas e o Coeficiente Global de Transferência de Calor	12
2.2 Permutador de calor	14
2.2.1 Permutador de placas	14
2.2.2 Equação projeto e análise de permutadores	16
2.3 Bombas Centrífugas.....	17
2.3.1 Curva do sistema	17
2.3.2 Curva da bomba e ponto de operação	18
2.3.3 Leis de afinidade	19
3. Setor em estudo: Mistura.....	21
3.1. Mistura.....	21
3.2. Matéria-prima	23
3.3. Processo de Mistura	25
3.4. Misturador <i>Single</i> e <i>Tandem</i>	27
3.5. Linha de mistura	28
3.6. Unidade de Controlo de Temperaturas	28

4. Condições operatórias atuais	33
4.1 Consumo energético no setor de mistura	33
4.2 Avaliação do funcionamento do sistema de controlo	35
4.2.1 Caudal de recirculação	35
4.2.2 Perdas de calor nas tubagens	36
4.2.3 Análise dos permutadores	37
4.2.4 Análise das válvulas de controlo, resistências e parâmetros PID	39
4.3 Consumo energético nos TCUs	41
4.3.1 Linhas #10 e #11	42
4.3.2 Linhas #5, #6 e #7	45
4.4 Análise das temperaturas de recirculação	46
5. Medidas de manutenção e otimização.....	47
5.1 Válvulas de controlo e resistências	47
5.2 Configurações do controlador.....	47
6. Resultados obtidos	49
6.1 Alteração no consumo energético	49
6.1.1 Linha #10.....	49
6.1.2 Linha #11.....	51
6.1.3 Linhas #5, #6 e #7	54
6.2 Temperatura de doseamento de matérias primas	55
6.3 Melhorias no processo de mistura.....	56
6.4 Importância da monitorização do consumo energético	56
7. Conclusões	57
8. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	59
Referências Bibliográficas	61
Anexos.....	65
Anexo A - Exemplos de cálculo	65
Anexo B - Características de funcionamento das TCUs.....	71
Anexo C - Temperatura de doseamento de matérias primas	79

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Locais de Presença da Continental AG no mundo [2].....	2
Figura 1.2 - Instalações atuais da Continental Mabor na Rua Adelino Leitão Nr 330, Lousado [5].....	3
Figura 1.3 - Principais elementos constituintes de um misturador [8].....	5
Figura 1.4 - Talão do pneu [6].....	5
Figura 1.5 - Revestimento Interior do pneu [6].....	5
Figura 1.6 - Carcaça têxtil do pneu [6].....	6
Figura 1.7 - Cinta metálica do pneu [6].....	6
Figura 1.8 - Piso do Pneu [6].....	6
Figura 1.9 - Processo de reticulação: A - Borracha não Vulcanizada; B - Borracha Vulcanizada. [10].....	7
Figura 2.1 - Transferência de calor numa secção de um tubo com circulação de um fluido quente no interior e de um fluido frio no exterior [12].....	13
Figura 2.2 - Permutadores de placas [12].....	14
Figura 2.3 - Bomba centrífuga [14].....	17
Figura 2.4 - Curva de um sistema de bombagem [15].	18
Figura 2.5 - Ponto de operação numa bomba centrífuga [15].....	19
Figura 2.6 - Efeito da variação da velocidade de rotação da bomba no ponto de operação de sistemas dominados pelas perdas de carga [16].....	20
Figura 2.7 - Efeito da variação da velocidade de rotação da bomba no ponto de operação de sistemas dominados pela altura geométrica [16].	20
Figura 3.1 - Efeito das ações dispersivas e distributivas numa matriz [19].	21
Figura 3.2 - Rotor Tangencial [20].....	22
Figura 3.3 - Rotor Intermeshing [20].	22
Figura 3.4 - Distribuição dos ingredientes num pneu radial ligeiro [21].	23
Figura 3.5 - Variação da temperatura do composto e do torque exercido pelo motor em função do tempo num processo típico de misturação [8].	25
Figura 3.6 - Misturador Tandem [22].....	27
Figura 3.7 - Linha do setor de misturação [8].	28
Figura 3.8 - Esquema da TCU para uma zona do misturador #11	29
Figura 3.9 - Esquema da TCU da câmara superior do Misturador #11.....	30

Figura 3.10 - A: Válvula pneumática On/Off do tipo globo; B.1: Válvula pneumática do tipo globo com posicionador (vista frontal); B.2: Válvula pneumática do tipo globo com posicionador (vista lateral).	31
Figura 3.11 - Diagrama P&ID de uma zona do misturador.	32
Figura 4.1 - Evolução do consumo do setor da mistura relativamente ao consumo elétrico total da fábrica.	33
Figura 4.2 - Impacto do setor da mistura no consumo elétrico total da fábrica.	33
Figura 4.3 - Percentagem, %, de consumo dos principais equipamentos da linha #10 nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2019.	34
Figura 4.4 - Percentagem, %, de consumo dos principais equipamentos da linha #11 nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2019.	34
Figura 4.5 – Curvas da bomba ETABLOC GN 032-125- ϕ 118 mm para diferentes frequências de rotação e respetiva curva teórica do sistema, num determinado circuito do misturador #10.	35
Figura 4.6 - Painel de Controlo da TCU.	38
Figura 4.7 - Gráfico relativo à Potência recebida em função da Potência recebida na TCU da câmara inferior do misturador 11.	38
Figura 4.8 - Correto funcionamento das válvulas de controlo pneumático com posicionador durante o aquecimento da corrente (1 - Pressão de saída; 2 - Pressão de entrada).	39
Figura 4.9 - Gráfico representativo da instabilidade no controlo de temperatura da corrente da TCU para uma banda morta de 1 °C. + : Resistência ligada, válvula fechada; - : Válvula aberta, resistência desligada.	41
Figura 4.10 - Potência média das TCUs do misturador da linha #10 entre os meses de Fevereiro de 2018 e Abril de 2019.	42
Figura 4.11 - Potência média das TCUs do misturador da linha #11 entre os meses de Abril de 2018 e Abril de 2019.	43
Figura 4.12 - Potência média mensal das TCUs da calandra das linhas #10 e #11 entre os meses de Abril de 2018 e Abril de 2019.	44
Figura 4.13 - Potência média das TCUs do misturador das linhas #5, #6 e #7 entre 5 de Abril e 14 de Maio de 2019.	45
Figura 4.14 - Desvios de temperatura em alguns dos compostos mais produzidos no misturador #10 durante o mês de abril.	46

Figura 5.1 - Gráfico representativo do controlo de temperatura da corrente da TCU para uma banda morta de 3 °C. - : Válvula aberta, resistência desligada.	48
Figura 6.1 - Potência média das TCUs do misturador da linha #10 antes a após a implementação das reparações e otimizações.	50
Figura 6.2 - Potência média da TCU da câmara inferior do misturador da linha #11 antes a após a implementação das reparações e otimizações.....	52
Figura 6.3 - Potência média da TCU da câmara superior do misturador da linha #11 antes a após a implementação das reparações e otimizações.....	52
Figura 6.4 - Potência média da TCU da câmara do misturador da linha #6 entre 9 de Abril e 26 de Junho de 2019.	54
Figura A.1 - Curvas específicas da bomba ETABLOC GN 032-125 para uma frequência de rotação de 50 Hz.	65
Figura A.2 - Curvas da bomba ETABLOC GN 032-125- ϕ 120 mm para diferentes frequências de rotação.	66
Figura A.3 - Curvas da bomba ETABLOC GN 032-125- ϕ 118 mm para diferentes frequências de rotação e respetivas curvas teórica e experimental do sistema, num determinado circuito.	67

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Matéria-prima utilizada no processo de mistura e suas principais funções.	24
Tabela 4.1 – Perdas de calor máximas e mínimas nos circuitos de recirculação das TCUs para os misturadores #10 e #11.	37
Tabela 6.1 - Comparação entre a potência média e o custo anual previsto e após a otimização das TCUs do misturador da linha #10.....	50
Tabela 6.2 - Comparação entre a potência média e custo anual anterior e após a otimização das TCUs do misturador da linha #11.....	53
Tabela 6.3 - Potência média e custo anual atual das TCUs dos misturador das linhas #5, #6 e #7.	55
Tabela A.1 - Correlações empíricas para o cálculo do coeficiente de transferência de calor do ar a 1 atm convecção natural [12].....	61
Tabela B.1 - Percentagem do consumo dos principais equipamentos da linha #10.....	71
Tabela B.2 - Percentagem do consumo dos principais equipamentos da linha #11.....	71
Tabela B.3 – Eficiência da transferência de calor na câmara inferior do misturador #11.....	72
Tabela B.4 - Eficiência da transferência de calor na câmara superior do misturador #11.....	72
Tabela B.5 - Eficiência da transferência de calor na calandra da linha #11.....	73
Tabela B.6 - Eficiência da transferência de calor na câmara superior do misturador #10.....	73
Tabela B.7 - Eficiência da transferência de calor na calandra da linha #10.....	73
Tabela B.8 - Desvios de temperatura nas TCUs no processo de mistura dos compostos mais produzidos nos misturador #10.....	74
Tabela B.9 - Desvios de temperatura nas TCUs no processo de mistura dos compostos mais produzidos nos misturador #11.....	75

Tabela B.10 - Potência medida das resistências elétricas e bombas centrífugas das TCUs das linhas #10 e #11 no mês de Abril de 2019.....	76
Tabela B.11 - Valores experimentais do consumo de energia elétrica das TCUs do misturador das linhas #5, #6 e #7.....	77
Tabela C.1 - Poupança anual após otimização das temperaturas de doseamento de matérias primas na linha #10.....	79

Lista de siglas

<i>MMS</i>	Mixing Management System
<i>TCU</i>	Unidade de Controlo de Temperaturas
<i>PID</i>	Proporcional Integral Derivativo

Lista de símbolos

<i>A</i>	Área	[m ²]
<i>A_{ext}</i>	Área externa	[m ²]
<i>A_{lm}</i>	Área média logarítmica	[m ²]
<i>cp</i>	Calor específico	[K J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
<i>cp_q</i>	Calor específico do fluido quente	[K J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
<i>cp_f</i>	Calor específico do fluido frio	[K J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
<i>D</i>	Diâmetro	[m]
<i>f</i>	Fator de atrito de fanning	[]
<i>g</i>	Aceleração gravítica	[m. s ⁻²]
<i>Gr</i>	Número de Grashof	[]
<i>H</i>	Altura manométrica	[m]
<i>h</i>	Coefficiente pelicular de transferência de calor	[W. m ⁻² . K ⁻¹]
<i>L</i>	Dimensão característica do sistema	[m]
<i>ℓ</i>	Comprimento do cilindro	[m]
<i>k</i>	Condutividade térmica	[W. m ⁻¹ . K ⁻¹]
<i>M_{ar}</i>	Massa molar do ar	[kg. mol ⁻¹]
<i>ṁ_f</i>	Caudal mássico do fluido frio	[kg. s ⁻¹]
<i>ṁ_q</i>	Caudal mássico do fluido quente	[kg. s ⁻¹]
<i>N</i>	Rotações da bomba	[rpm]
<i>P</i>	Potência útil	[Kw]
<i>P_{ar}</i>	Pressão do ar	[atm]
<i>Pr</i>	Número de Prandtl	[]
<i>Q</i>	Caudal volumétrico	[m ³ . h ⁻¹]
<i>q</i>	Potência térmica	[W]

q_{cond}	Potência térmica de condução	[W]
q_{conv}	Potência térmica de convecção	[W]
q_{rad}	Potência térmica de radiação	[W]
$q_{conv+rad}$	Potência térmica combinada de convecção e radiação	[W]
\dot{q}	Potência gerada	[W. m ⁻³]
\dot{q}	Fluxo térmico	[W. m ⁻²]
q_f	Potência térmica do fluido frio	[W]
q_q	Potência térmica do fluido quente	[W]
r	Raio	[m]
R	Constante dos gases perfeitos	[m ³ . atm. K ⁻¹ . mol ⁻¹]
R_t	Resistência térmica total	[K. W ⁻¹]
T	Temperatura	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar	[°C]
T_{∞}	Temperatura do fluido frio	[°C]
T_{fe}	Temperatura do fluido frio à entrada	[°C]
T_{fs}	Temperatura do fluido frio à saída	[°C]
T_{qe}	Temperatura do fluido quente à entrada	[°C]
T_{qs}	Temperatura do fluido quente à saída	[°C]
T_p	Temperatura da parede externa	[°C]
T_s	Temperatura da superfície	[°C]
ΔT	Diferença de temperatura	[°C]
Δx	Espessura	[m]
Δz	Diferença de nível	[m]
U	Coefficiente global de transferência de calor	[W. m ⁻² . K ⁻¹]
v	Velocidade de escoamento	[m ²]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W. m ⁻² . K ⁻⁴]
ε	Emissividade	[]
ρ	Massa volúmica	[kg. m ⁻³]
β	Coefficiente volumétrico de expansão do ar	[K ⁻¹]
μ	Viscosidade	[kg. m ⁻¹ . s ⁻¹]

1. Introdução

Neste capítulo faz-se um enquadramento da dissertação do projeto a desenvolver, uma apresentação sumária da empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A e uma descrição do estado da arte referente ao processo de fabrico do Pneu.

1.1 Enquadramento da dissertação

A realização desta dissertação enquadra-se na unidade curricular de Dissertação/Estágio que contem 34 ECTS do 2º ano, 2º semestre do Mestrado em Engenharia Química opção: energia e biorrefinaria com início a 1 de Fevereiro e com fim a 25 de Julho.

O projeto desenvolvido tem com base o tema “Aumento da Eficiência Energética na área da Mistura”. O objetivo principal visou o levantamento energético na área da Mistura, a respetiva análise, elaboração de propostas de melhoria e a implementação de medidas para reduzir o consumo energético da fábrica.

1.2 História da empresa

A Mabor – Manufatura Nacional de Borracha, S.A. - foi a primeira fábrica de pneus em Portugal. Iniciou a sua laboração em 1946 e em Julho de 1990 iniciou o grande projeto de reestruturação com o Grupo Continental AG, que passou a deter 100% do capital, e transformou as antigas instalações da Mabor na mais moderna das então 21 unidades da Continental, transformando-se na marca “Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A.”, localizada em Lousado [1].

Para além da produção de pneus, o Grupo Continental é especialista na produção de sistemas de travagem, controlos dinâmicos para viaturas, tecnologias de transmissão de potência, sistemas eletrónicos e sensores. É constituído por 243 226 colaboradores, opera em 60 países, em cerca de 544 locais diferentes, sendo visível na **Figura 1.1** os vários locais em que a Continental está presente [2].

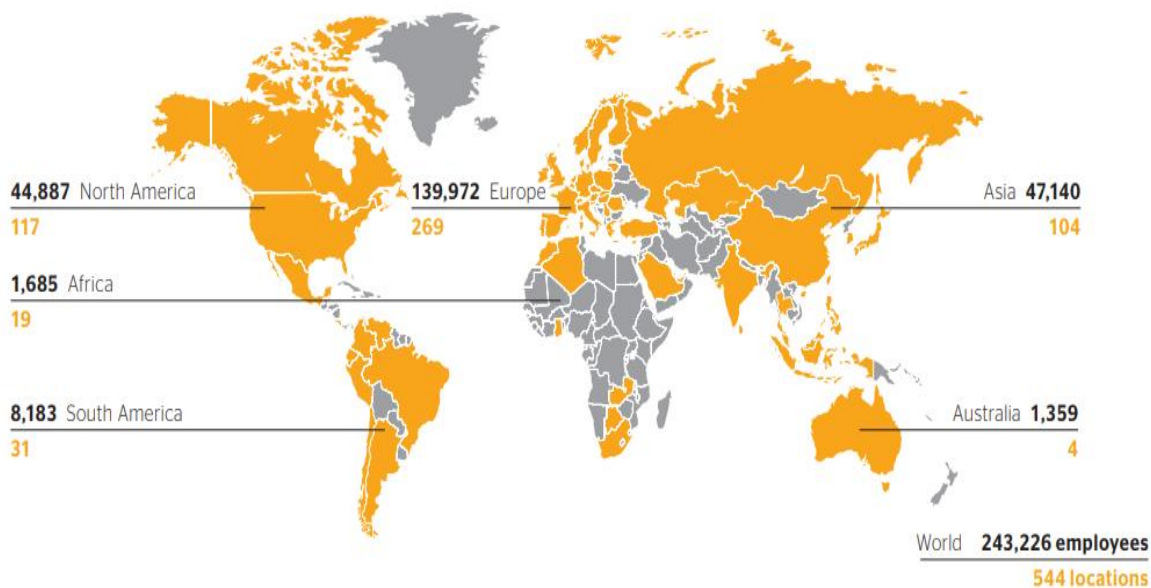


Figura 1.1 - Locais de Presença da Continental AG no mundo [2].

Partindo de uma produção média de 5 mil pneus por dia em 1990, após integração no Grupo Alemão, em apenas 6 anos a Continental Mabor conseguiu quadruplicar a sua produção anual, passando a produzir cerca de 20 mil pneus por dia. Atualmente a Continental Mabor tem uma capacidade de produção média de 50 a 60 mil pneus por dia, apresentando-se como uma das fábricas do Grupo Continental com melhores índices de produtividade. Em 2017 do volume total de pneus vendidos cerca de 98% tiveram como destino a exportação, correspondendo a vendas de 878 milhões de euros e lucros de 211,6 milhões de euros. O designado “mercado de substituição” absorve mais de metade da sua produção anual, sendo a restante parte distribuída pelas linhas de montagem dos mais prestigiados construtores da indústria automóvel [1, 3, 4].

A Continental Mabor tem uma superfície total de 236 000 m², conta com aproximadamente 2 729 colaboradores e opera 24 horas por dia, 350 dias por ano. A **Figura 1.2** apresenta as instalações atuais da empresa [5].



Figura 1.2 - Instalações atuais da Continental Mabor na Rua Adelino Leitão Nr 330, Lousado [5].

1.3 Produto e processo de fabrico

1.3.1 Requisitos e funções básicas de um Pneu

É essencial que qualquer pneu cumpra 3 funções básicas:

- Manter um volume de ar comprimido que suporte o veículo;
- Transmitir forças longitudinais e laterais do veículo à estrada;
- Complementar a suspensão do veículo.

Perante estes aspetos básicos, a qualidade e distinção de um pneu serão definidos tendo em conta certos requisitos, tais como [6]:

- Económicos: tempo de vida útil do pneu face ao desgaste, resistência ao rolamento (que afeta o consumo do veículo) e o seu preço de venda;
- Ambientais: emissão de ruído, necessidade de materiais para o seu fabrico e profundidade do piso no seu fim de vida;
- Conforto: absorção de impactos na estrada, ruído interior e conforto nas manobras;
- Segurança: distância de travagem, tração em qualquer tipo de piso (seco, molhado, neve ou gelo), estabilidade direcional, durabilidade e robustez.

1.3.2 O processo de fabrico do Pneu

O processo de fabrico da Continental Mabor está dividido em cinco fases principais:

- Mistura
- Preparação
- Construção
- Vulcanização
- Inspeção final

A produção inicia-se com a mistura, onde são produzidos os vários tipos de compostos de borracha que depois seguem para a preparação. Nesta fase de preparação as paletes de composto vindas da mistura e outros materiais como arame e tecido têxtil, são utilizados para a produção de componentes necessários à montagem do pneu na fase de construção. Na penúltima fase – vulcanização - ocorre a reação química de reticulação dos polímeros que permite a transformação da borracha do estado viscoelástico para um estado elástico e o pneu assume então a sua forma e relevo pretendido. Finalmente, na última etapa, o pneu é submetido a uma inspeção que garante o cumprimento de todos os requisitos de qualidade. Em seguida será realizada uma breve descrição de cada uma destas fases [7].

- Mistura

A primeira fase de todo o processo diz respeito à mistura. Inicialmente, e de acordo com o produto final pretendido, são efetuadas a pesagem e a medição das matérias-primas especificadas como polímeros de borracha natural e sintética, materiais de enchimento, de reforço e de antienvelhecimento e materiais plastificantes como óleos e resinas, entre outros. De seguida estes compostos são inseridos nos misturadores donde resulta um composto de borracha homogénea que passará à fase seguinte. A **Figura 1.3** apresenta os principais componentes de um misturador. Pelo facto de este ser o processo principal onde irá incidir a dissertação, no **Capítulo 3** será feita uma abordagem mais aprofundada.

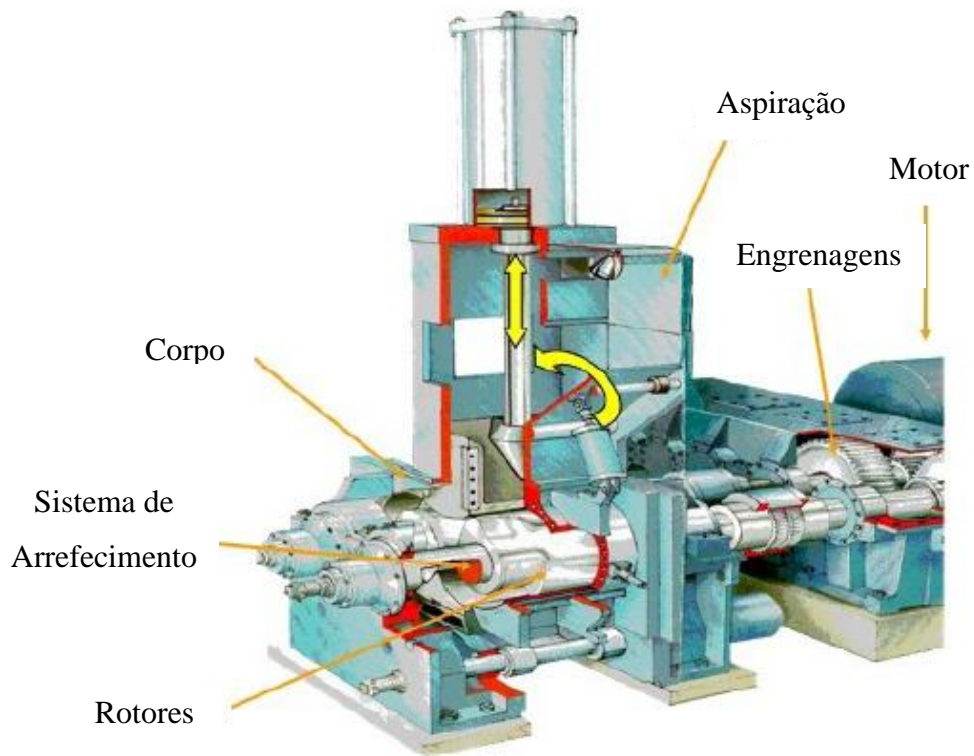


Figura 1.3 - Principais elementos constituintes de um misturador [8].

- Preparação

Nesta fase as mesas de borracha vindas da mistura e outros materiais como arame e tecido têxtil são processados em extrusoras, calandras e máquinas de corte para a produção de componentes necessários à construção do pneu. Os principais componentes produzidos nesta etapa são [6]:

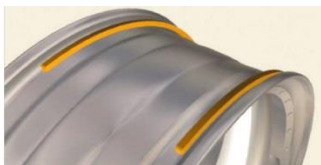


Figura 1.4 - Talão do pneu [6].

➤ Talão: fio de aço coberto de borracha que tem como finalidade manter o pneu firme na jante, transmitir o binário do motor e garantir a estanquicidade do pneu – **Figura 1.4**;

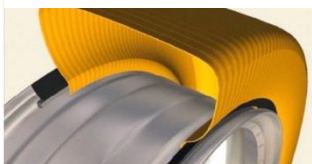


Figura 1.5 - Revestimento Interior do pneu [6].

➤ Revestimento interior: composto de borracha que veda o interior do pneu - **Figura 1.5**;

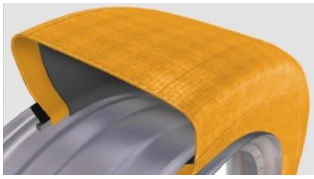


Figura 1.6 - Carcaça têxtil do pneu [6].

➤ Carcaça têxtil: cordas de rayon ou poliéster numa matriz de borracha que têm como objetivo impedir a expansão do ar comprimido no interior do revestimento - **Figura 1.6**;

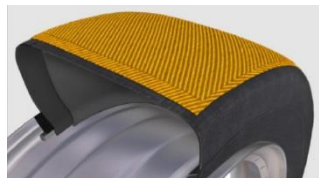


Figura 1.7 - Cinta metálica do pneu [6].

➤ Cinta metálica: cordas de aço de elevada resistência que conferem rigidez circunferencial para estabilizar a forma do pneu – **Figura 1.7**;



Figura 1.8 - Piso do Pneu [6].

➤ Piso: borracha natural e/ou sintética que influencia o ruído, desgaste, aderência e resistência ao rolamento – **Figura 1.8**.

▪ Construção

A fase de construção está dividida em vários módulos, sendo que cada módulo é constituído por 2 máquinas responsáveis pela montagem, designadas de KM (Karkasse Maschine) e PU (Production Unit). A carcaça do pneu é construída na KM, e de seguida a PU junta à carcaça as telas metálicas, piso e cintas têxteis. Os pneus resultantes, designados de pneus em “verde” ou pneus em cru, são transportados para a etapa de vulcanização [9].

▪ Vulcanização

A vulcanização é um processo de reticulação no qual através da aplicação de calor e pressão se altera a estrutura química da borracha pela conversão das moléculas do polímero independente numa rede tridimensional onde ficam ligadas entre si. A

vulcanização converte um emaranhamento viscoso de moléculas com longa cadeia numa rede elástica tridimensional, unindo quimicamente estas moléculas em vários pontos ao longo da cadeia, aumentando assim a resistência e dureza da borracha. Na **Figura 1.9** é possível observar uma representação do processo de reticulação [10].

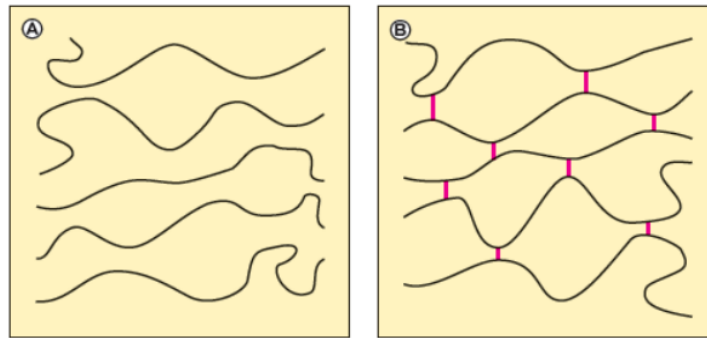


Figura 1.9 - Processo de reticulação: A - Borracha não Vulcanizada; B - Borracha Vulcanizada. [10]

As principais variáveis a controlar neste processo são:

- Temperatura: influencia as propriedades mecânicas do produto final;
- Tempo: varia consoante o tipo de borracha e tamanho do pneu;
- Pressão: é um fator importante no processo de moldação e evita que certos compostos passem ao estado gasoso.

- Inspeção final

Nesta fase final são feitas todas as verificações visuais e inspeções automáticas para averiguar se todos os requisitos de qualidade são cumpridos e se o pneu está pronto para ser expedido. São controlados parâmetros como o peso, diâmetro, excentricidade, resposta do pneu perante forças radiais e laterais, entre outros. Após a aprovação das especificações definidas, os pneus seguem para o armazém de produto acabado [7].

1.4 Objetivos

O objetivo principal da dissertação foi o aumento da eficiência energética do setor de mistura e consistiu nos seguintes objetivos:

- Caracterização da situação atual;
- Análise do efeito no consumo energético das temperaturas atualmente definidas nas Unidades de Controlo de Temperatura;
- Estudo da eficiência e funcionamento atual das TCUs, sugestão e/ou implementação de otimizações no sistema e quantificação da poupança anual.
- Quantificação da poupança anual resultado de um trabalho de otimização das temperaturas de doseamento de matérias primas;

1.5 Estrutura global

A presente dissertação é constituída por 7 capítulos, sendo este o primeiro capítulo introdutório, onde é realizado um enquadramento do tema a desenvolver, os seus principais objetivos e uma breve referencia ao processo de fabrico do Pneu.

No segundo capítulo efetuou-se uma revisão bibliográfica acerca dos principais processos de transferência de calor, a equação projeto de permutadores e a análise de permutadores de placas e bombas centrífugas.

No terceiro capítulo é feita um análise detalhada do processo de mistura e das Unidades de Controlo de Temperatura presentes nesse setor.

No quarto capítulo é realizado um levantamento energético do setor de mistura e das condições operatórias atuais das TCUs e no quinto capítulo são indicadas as medidas de manutenção e otimização que foram implementadas.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos relativamente às alterações do consumo energético nas unidades, ao trabalho de otimização das temperaturas de doseamento de matérias primas, às melhorias do processo de mistura e à importância da monitorização do consumo energético.

Nos capítulos sete e oito apresentam-se, respetivamente, as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Nesta secção vão ser apresentados os principais processos de transferência de calor, a equação projeto de permutadores e a análise de permutadores de placas e bombas centrífugas.

2.1 Processos de transferência de calor

O calor é o termo associado à transferência de energia que ocorre entre dois sistemas quando existe uma diferença de temperaturas entre eles, dirigindo-se sempre da zona de temperatura mais elevada para a zona de temperatura mais baixa. Está associado a muitas situações da vida quotidiana, bem como a muitos processos industriais.

O calor que se transfere por unidade de tempo denomina-se taxa de transferência de calor ou potência térmica, q . O fluxo de calor, \dot{q} , é a quantidade de calor transferida por unidade de tempo e por unidade de área. Assim [11, 12]:

$$\dot{q} = \frac{q}{A} \quad (2.1)$$

Se a temperatura num determinado ponto do corpo se mantiver constante no tempo está-se perante uma situação de estado estacionário. Caso contrário, a transmissão de calor processa-se em estado não estacionário ou em regime transitório. Existem três mecanismos de transferência de calor: a condução, a convecção e a radiação. A condução ocorre quando o meio de transferência de calor, sólido ou fluido, se encontra parado. A convecção, por sua vez, caracteriza-se pelo movimento global da massa e refere-se, por exemplo, à transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento. A transferência de calor por radiação corresponde à propagação de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas num determinado meio ou no vazio. A seguir apresentam-se as principais características de cada um destes mecanismos.

2.1.1 Condução

A condução é vista como um fenómeno em que a transferência de energia se dá à escala molecular, das partículas com energia interna mais elevada para as de energia interna mais baixa, num meio parado. O calor é conduzido por transferência de energia entre moléculas adjacentes que, ao chocarem umas com as outras, promovem a propagação de energia. De acordo com a Lei de Fourier, o calor transferido em tubos cilíndricos por condução radial pode ser determinado pela seguinte equação [11, 12]:

$$q_{cond} = -k 2\pi r \ell \frac{dT}{dr} \quad (2.2)$$

Na análise da transferência de calor por condução, considerando variação da temperatura nas três direções e aplicando um balanço de energia ao sistema, é possível obter a equação geral de condução em coordenadas cilíndricas, equação (2.3).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q} = \rho cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

Esta equação, sob condições de regime estacionário, transferência de calor apenas segundo a direção radial e na ausência de geração de calor, pode ser reescrita de acordo com a equação (2.4).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (2.4)$$

2.1.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é devida ao movimento aleatório das moléculas conjugado com o movimento macroscópico do fluido, em que elementos de volume do fluido a temperatura mais alta trocam calor com outros elementos a temperatura mais baixa. Este mecanismo tem lugar entre uma superfície sólida e um fluido que estão a temperaturas diferentes.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento, como convecção forçada ou convecção natural. Na convecção forçada, o escoamento do fluido é induzido por um agente externo como, por exemplo, uma bomba, um ventilador, um agitador ou uma diferença de cotas. Na convecção natural, o movimento macroscópico do fluido resulta de diferenças de massa volúmica originadas por variações da temperatura no fluido. Apesar da natureza complexa da transferência de calor por convecção, a equação básica que contabiliza o calor transferido por unidade de tempo é a lei de Newton do arrefecimento, dada por [11, 12]:

$$q_{conv} = h A (T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

Para determinar o calor transferido por convecção natural entre uma superfície sólida e o fluido é necessário calcular o coeficiente médio de transferência de calor. No **Anexo A.2** apresentam-se correlações simplificadas para determinação do h de convecção natural para o ar, em função dos números adimensionais Grashof e Prandtl, que podem ser determinados através das expressões (2.6) e (2.7).

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (2.6)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.7)$$

Nestas equações todas as propriedades são referentes ao fluido e avaliadas à temperatura média do filme, ΔT é a diferença positiva de temperaturas entre o fluido e a parede e L representa uma dimensão característica correspondente à geometria do sistema.

2.1.3 Radiação

A radiação define-se como a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) e é o resultado de modificações que ocorrem nas configurações eletrónicas dos átomos e das moléculas. A transferência de energia por radiação não precisa de um meio físico para se transmitir, sendo esta a grande diferença relativamente aos mecanismos de transferência de calor por condução e por convecção. As ondas eletromagnéticas propagam-se à velocidade da luz e não sofrem nenhuma atenuação no vácuo.

A potência térmica transferida por radiação entre um pequeno corpo à temperatura T_1 e um grande espaço à temperatura T_{viz} pode ser estimada pela equação [11, 12]:

$$q_{conv} = A \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_{viz}^4) \quad (2.8)$$

2.1.4 Condução e Convecção Combinadas e o Coeficiente Global de Transferência de Calor

Em muitas situações reais, nomeadamente na análise de permutadores de calor, os mecanismos de transferência de calor por condução e convecção estão presentes em simultâneo. De acordo com a situação apresentada na **Figura 2.1**, considerando estado estacionário, a potência transferida do fluido quente para o fluido frio pode ser calculada pelas seguintes equações [11, 12]:

$$q = h_1 A_1 (T_{\infty 1} - T_{s1}) = \frac{k A_{lm}}{r_2 - r_1} (T_{s1} - T_{s2}) = h_2 A_2 (T_{s2} - T_{\infty 2}) \quad (2.9)$$

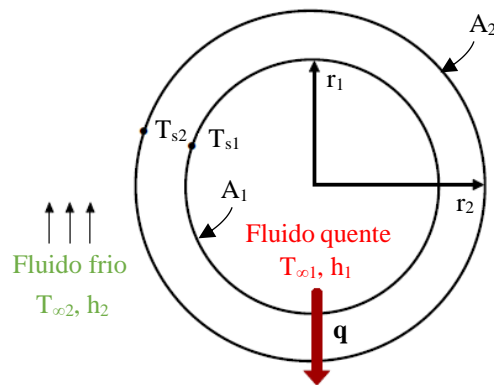


Figura 2.1 - Transferência de calor numa secção de um tubo com circulação de um fluido quente no interior e de um fluido frio no exterior [12].

A partir da equação (2.9) é possível relacionar a potência térmica com a diferença global de temperatura:

$$q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\Delta x}{k A_{lm}} + \frac{1}{h_2 A_2}} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_t} = \frac{\Delta T_{global}}{R_t} \quad (2.10)$$

A potência térmica transferida pelos mecanismos combinados de condução e convecção é, muitas vezes, expressa em termos do coeficiente global de transferência de calor, U , sendo que no caso de transferência de calor radial, a área da superfície de transferência de calor varia com raio e o coeficiente global de transferência de calor tanto pode ser baseado na área interna, A_1 , como na área externa, A_2 . Assim:

$$q = U_1 A_1 \Delta T_{global} = U_2 A_2 \Delta T_{global} = \frac{\Delta T_{global}}{R_t} \quad (2.11)$$

e

$$R_t = \frac{1}{U_1 A_1} = \frac{1}{U_2 A_2} \quad (2.12)$$

2.2 Permutador de calor

Um permutador de calor é um equipamento que permite realizar a transferência de calor entre dois ou mais fluidos que se encontram a temperaturas diferentes. São projetados e construídos por empresas especializadas, que têm em conta os efeitos da transferência de calor entre os fluidos, e as perdas de carga que estes sofrem ao atravessar o permutador. São utilizados em diversos processos industriais como: geração de energia, sistemas de ar condicionado, sistemas de recuperação de calor e associados a colunas de destilação. Podem ser construídos em várias configurações, tipos e tamanhos pelo que podem ser classificados dependendo do processo de transferência de calor, de acordo com a sua compacticidade, pelo tipo de construção, pela disposição das correntes e pelos mecanismos de transferência de calor envolvidos. Nesta dissertação os equipamentos que serão analisados são os permutadores de placas.

2.2.1 Permutador de placas

Um permutador de placas consiste num empilhamento de placas de metal finas com aberturas para entrada/saída dos fluidos, apertadas conjuntamente num quadro - **Figura 2.2**. Cada par de placas adjacentes no permutador forma um canal através do qual escoam um dos fluidos. Uma junta fina veda as placas a toda a volta das suas bordas, evitando assim a mistura dos fluidos. Os fluidos quente e frio escoam em passagens alternadas e o calor é transferido do fluido quente para o frio através da placa metálica que os separa.

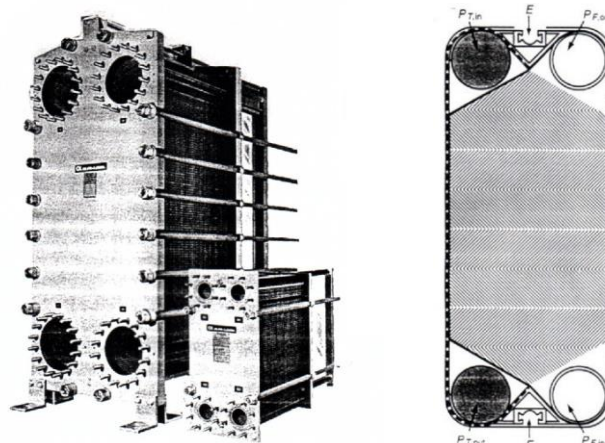


Figura 2.2 - Permutadores de placas [12].

▪ Vantagens e Limitações

Desde 1930 que os permutadores de placas são aplicados nas indústrias química e alimentar. São sistemas de transferência de calor muito flexíveis pois podem ser adaptados a uma vasta gama de fluidos e condições de operação, desde que não se excedam temperaturas superiores a 250 °C e pressões superiores a 25 atm. Podem ser usados para sistemas líquido-líquido, gás-líquido ou líquido-vapor condensante e são apropriados para trabalhar com líquidos viscosos e não-Newtonianos. A sua utilização exclui o processamento de líquidos tóxicos ou altamente inflamáveis, devido à possibilidade de fugas pelas juntas de vedação. As vantagens e limitações destes permutadores podem ser resumidas no seguinte [12]:

- são permutadores compactos, pelo que ocupam áreas pouco significativas;
- podem ser facilmente desmontados, pelo que são aconselháveis para fluidos que provocam sujamento;
- apresentam coeficientes de transferência de calor relativamente elevados (duas a três vezes maiores do que os associados aos permutadores de carcaça e tubos), pelo que podem operar com diferenças de temperatura relativamente baixas;
- são permutadores relativamente baratos;
- permitem a adição e a remoção de placas térmicas no caso de se pretender alterar os parâmetros do projeto;
- apresentam as desvantagens de haver limites na temperatura e na pressão de operação, bem como a possibilidade de fugas através das vedações.

Estes permutadores podem ter uma variada gama de placas que apresentam diferentes tipos de ondulações, conferindo-lhes rugosidade e aumentando assim a sua resistência mecânica, bem como a turbulência do escoamento nos canais. Este aumento da turbulência é responsável pela maior eficiência térmica que os permutadores de placas apresentam relativamente aos permutadores de carcaça e tubos.

2.2.2 Equação projeto e análise de permutadores

Para projetar um permutador de calor ou para analisar o comportamento de um permutador já existente é necessário relacionar a potência térmica em jogo com outras grandezas, aplicando balanços de energia aos fluidos quente e frio. Para o caso particular de um sistema termicamente isolado, se forem desprezáveis as variações de energia cinética e potencial, os fluidos não mudarem de fase e os calores específicos respetivos se considerarem constantes, então o balanço térmico aos fluido quente e frio, em estado estacionário, permite escrever as equações (2.13) e (2.14) [12, 13].

Para o fluido quente tem-se

$$q_q = \dot{m}_q c p_q (T_{qe} - T_{qs}) \quad (2.13)$$

Para o fluido frio tem-se:

$$q_f = \dot{m}_f c p_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (2.14)$$

A equação geral de projeto para transferência de calor aplicada a um permutador de calor é baseada na equação (2.11), sendo, neste caso, ΔT_{global} a média logarítmica da diferença de temperaturas entre os fluidos, ΔT_{lm} , uma vez que a diferença de temperatura entre os fluidos varia com a posição no permutador. Assim:

$$q = U A \Delta T_{lm} = U A \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (2.15)$$

Sendo $\Delta T_A = T_{qe} - T_{fs}$ e $\Delta T_B = T_{qs} - T_{fe}$ para permutadores em contracorrente e $\Delta T_A = T_{qe} - T_{fe}$ e $\Delta T_B = T_{qs} - T_{fs}$ para permutadores em correntes paralelas.

2.3 Bombas Centrífugas

Uma bomba hidráulica é um dispositivo que converte energia mecânica de um eixo em energia hidráulica, permitindo assim o movimento de um fluido. As formas de transmissão de energia podem ser por aumento de pressão, velocidade ou elevação, ou qualquer combinação destes processos. Podem-se distinguir 2 grandes grupos [14]:

- Bombas centrífugas, também conhecidas como rotodinâmicas;
- Bombas volumétricas, também conhecidas como de deslocamento positivo.

Uma bomba centrífuga trabalha transferindo energia cinética para o fluido e transformando-a em energia de pressão. Esta ação é realizada mecanicamente pela rotação de um impulsor dotado de pás (hélice), o qual recebe o fluido pelo seu centro e pela ação da força centrífuga expulsa-o pela periferia – **Figura 2.3**.

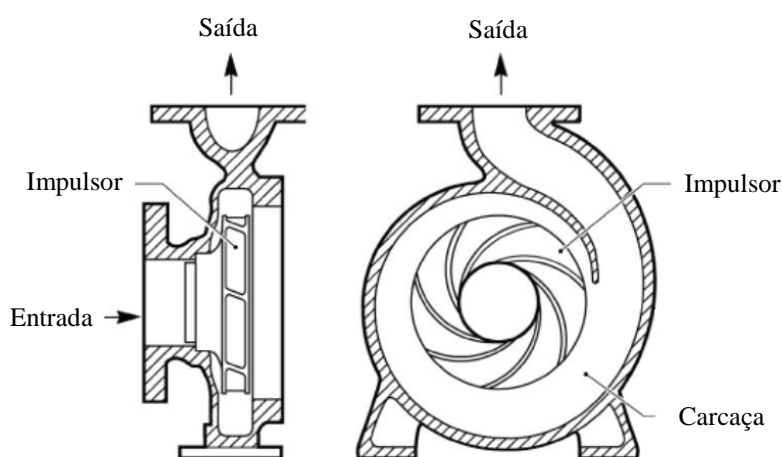


Figura 2.3 - Bomba centrífuga [14].

2.3.1 Curva do sistema

Num sistema de bombagem o objetivo principal é, na maioria dos casos, transferir um fluido da fonte para o destino - encher um reservatório a uma dada altura ou recircular um fluido num sistema. Para tal é necessário que o fluido esteja a uma determinada pressão, tendo que superar perdas no sistema para poder fluir a um certo caudal. Estas perdas podem ser de dois tipos: estáticas ou dinâmicas. Perdas estáticas resultam do

desnível geométrico entre a fonte e o destino do fluido e são independentes do caudal; perdas dinâmicas, mais conhecidas como perdas de carga, resultam da resistência ao escoamento provocado pelas tubagens, válvulas e equipamentos, e são proporcionais ao quadrado do caudal. A equação geral da curva do sistema pode ser dada pela equação (2.16) [15]:

$$H = \Delta z + 2f \frac{L}{D} \frac{v^2}{g} \quad (2.16)$$

Grande parte dos sistemas têm uma combinação de perdas estáticas e dinâmicas, sendo apresentado na **Figura 2.4** uma curva típica de um sistema de bombagem. No caso de um sistema de recirculação este apresentaria apenas perdas dinâmicas.

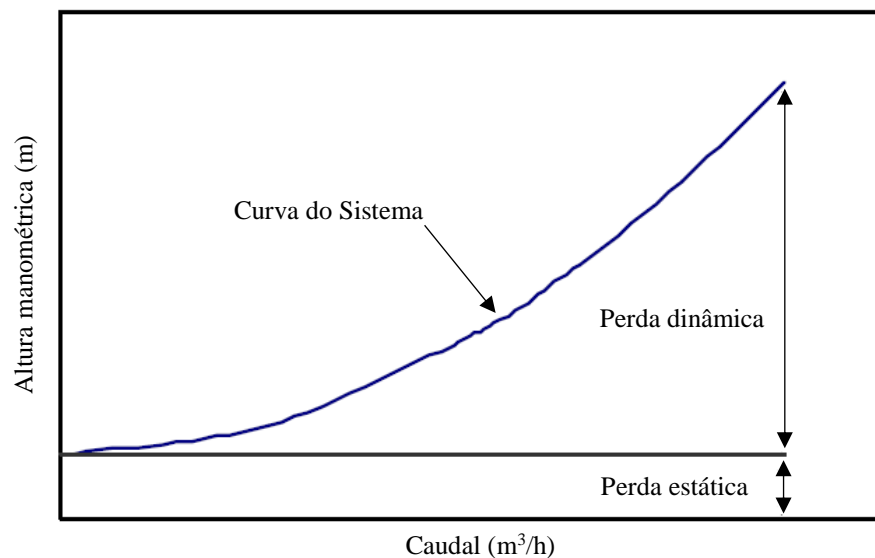


Figura 2.4 - Curva de um sistema de bombagem [15].

2.3.2 Curva da bomba e ponto de operação

O desempenho de uma bomba pode também ser expresso graficamente como a altura manométrica em função do caudal do fluido. O ponto de operação, que determina o caudal de circulação do sistema, resulta da interseção da curva da bomba com a curva do sistema – **Figura 2.5**.

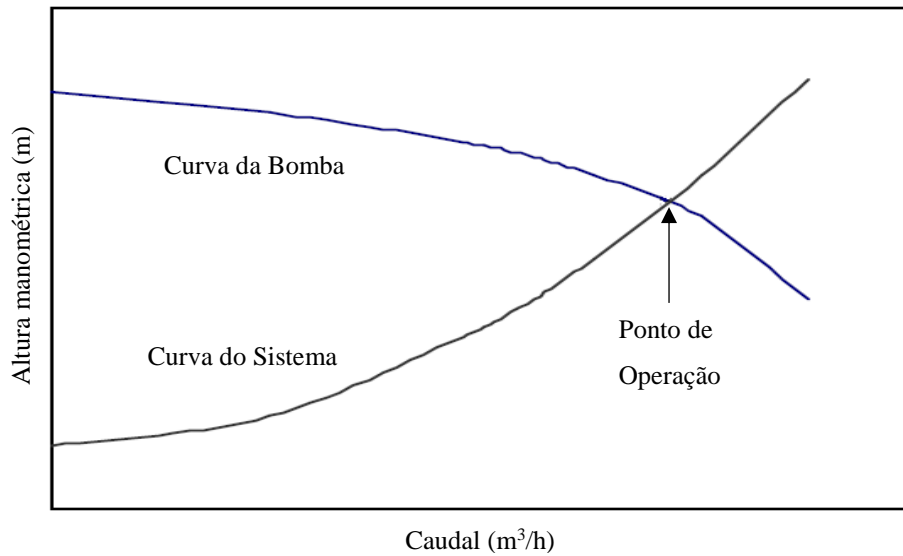


Figura 2.5 - Ponto de operação numa bomba centrífuga [15].

2.3.3 Leis de afinidade

As leis de afinidade são expressões que relacionam as diferentes variáveis envolvidas no desempenho de bombas tais como o caudal de circulação, a altura manométrica da bomba e a sua potência consumida. São extremamente úteis porque permitem a previsão do desempenho de uma bomba a velocidades de rotação diferentes ou com um diâmetro impulsor diferente. Na situação em que o diâmetro impulsor é constante e somente a velocidade de rotação é modificada, estas relações podem ser descritas pelas seguintes equações [16]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.17)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.18)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2.19)$$

Na situação em que a velocidade de rotação é constante e o diâmetro impulsor é modificado, as relações podem ser descritas pelas seguintes equações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (2.20)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (2.21)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (2.22)$$

Todavia, a aplicação destas expressões é apenas válida em sistemas cuja resistência ao escoamento representa a principal componente da altura manométrica. Nesta situação o sistema apresentará um funcionamento próximo do ideal, mantendo a eficiência constante em várias velocidades de rotação – **Figura 2.6**. Nos sistemas em que o desnível geométrico é relevante existe uma discrepância significativa entre o declive da tangente à curva do sistema e o correspondente das tangentes às curvas de iso-eficiência da bomba. Neste caso, perante alteração das velocidades de rotação, o desempenho da bomba deixa de obedecer às leis de afinidade, pelo que uma mudança do ponto de operação do sistema poderá conduzir a uma alteração significativa da sua eficiência – **Figura 2.7** [16].

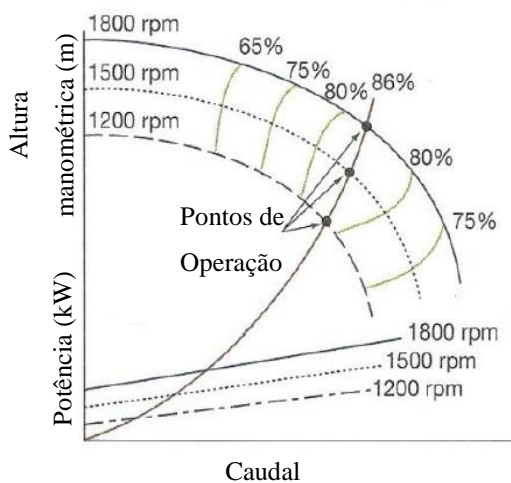


Figura 2.6 - Efeito da variação da velocidade de rotação da bomba no ponto de operação de sistemas dominados pelas perdas de carga [16].

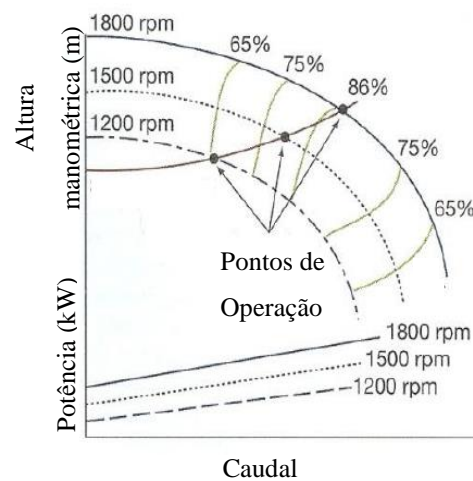


Figura 2.7 - Efeito da variação da velocidade de rotação da bomba no ponto de operação de sistemas dominados pela altura geométrica [16].

Na indústria um dos métodos mais utilizados que permite controlar a velocidade de rotação da bomba é aplicação de variadores de frequência que alteram o ponto de operação do sistema através da alteração da tensão e frequência da corrente fornecida ao motor elétrico.

3. Setor em estudo: Mistura

Neste capítulo faz-se inicialmente uma descrição detalhada do processo de mistura, nomeadamente das diferentes etapas existentes, dos parâmetros que influenciam a mistura e do tipo de misturadores utilizados. Posteriormente, faz-se uma análise pormenorizada das Unidades de Controlo de Temperatura.

3.1. Mistura

Em química, misturas são o produto da união mecânica entre duas ou mais substâncias sem ocorrer rutura de ligações químicas e, portanto, cada constituinte retém as suas propriedades. Contudo as propriedades físico-químicas de uma mistura, tais como o seu ponto de fusão e ponto de ebulição, diferem dos seus componentes puros. Num processo típico de mistura podemos distinguir 3 tipos de mistura [8, 17, 18]:

- Incorporação: tem como objetivo agregar na matriz de borracha todos os ingredientes, sejam estes sólidos ou líquidos;
- Dispersão: envolve a dispersão dos aditivos na matriz polimérica requerendo, por norma, mudança física nos componentes e grandes tensões de cisalhamento;
- Distribuição: ocorre a homogeneização de toda a massa de composto, ou seja, todos os ingredientes são distribuídos uniformemente em toda a borracha.

Na **Figura 3.1** pode-se ver o efeito das ações dispersivas e distributivas numa matriz.

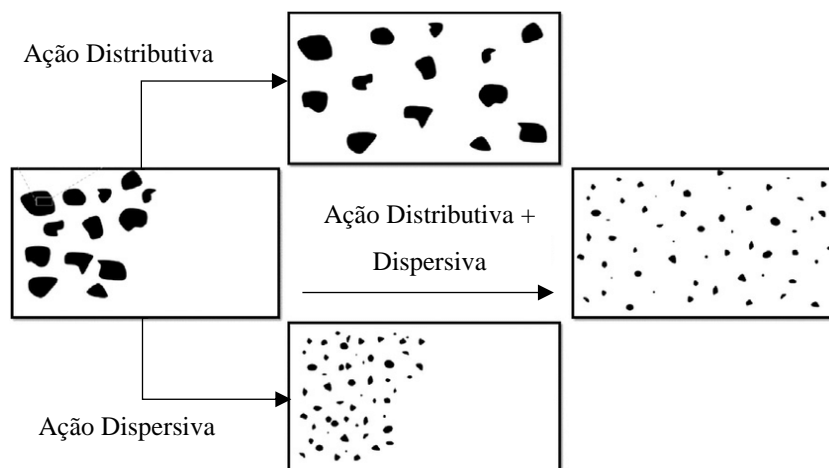


Figura 3.1 - Efeito das ações dispersivas e distributivas numa matriz [19].

O equipamento de mistura baseia-se num misturador que opera *batch a batch* e que contém dois rotores a rodar em sentido horário ou anti-horário dentro de uma câmara fechada (corpo do misturador), de tal modo que a carga é carregada e pressurizada para o seu interior através de um martelo pneumático e descarregada através de uma porta na parte inferior da câmara. Estes rotores também têm água a recircular no seu interior de modo a controlar a temperatura de mistura. A eficiência da mistura depende, em grande parte, do tipo de rotor utilizado, existindo principalmente dois tipos de rotores:

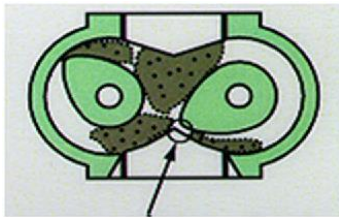


Figura 3.2 - Rotor Tangencial [20].

- Rotor Tangencial: a ação de mistura ocorre entre o rotor e as paredes internas da câmara – **Figura 3.2;**

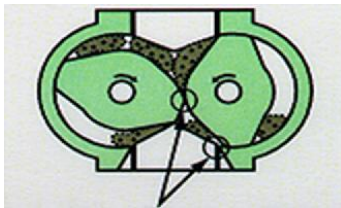


Figura 3.3 - Rotor *Intermeshing* [20].

- Rotor *Intermeshing*: a ação predominante de mistura ocorre entre ambos os rotores e entre o rotor e as paredes internas da câmara – **Figura 3.3.**

Cada tipo de rotor tem as suas vantagens e desvantagens, contudo está geralmente aceite que os rotores *intermeshing* são mais eficientes que os rotores tangenciais. Têm uma ação dispersiva mais eficiente, pelo facto de permitirem uma mistura entre ambos os rotores e entre o rotor e a câmara; têm uma maior eficiência de arrefecimento, pelo facto de a área de contacto entre o rotor e o composto ser maior. Por outro lado, a admissão inicial da carga – *intake* - não é tão eficaz, devido ao menor espaço existente entre os rotores *intermeshing* e, além disso, apresentam um maior consumo energético para a produção do mesmo composto. Contudo, como a qualidade do produto final é um critério fundamental, este tipo de rotor é o mais utilizado pela indústria [20].

3.2. Matéria-prima

Os compostos produzidos na mistura são constituídos por diferentes matérias-primas, dependendo das características do pneu que se pretende produzir. Na **Figura 3.4** pode-se observar a composição genérica de um pneu radial ligeiro.

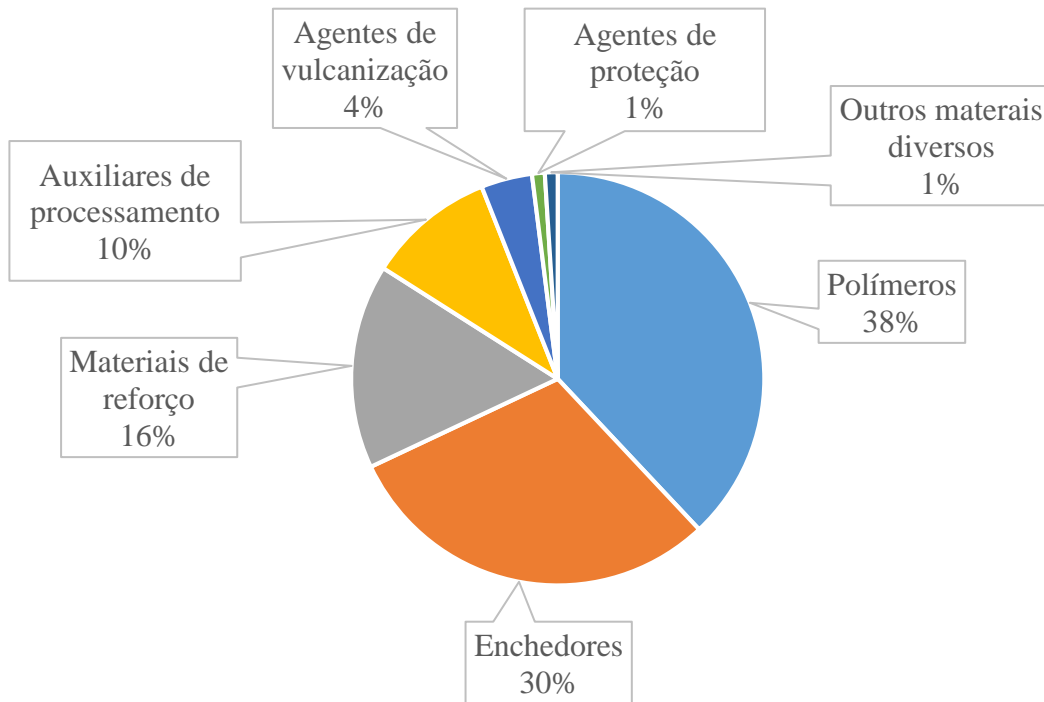


Figura 3.4 - Distribuição dos ingredientes num pneu radial ligeiro [21].

Na **Tabela 3.1** apresentam-se as principais funções de cada matéria-prima utilizada no processo de mistura.

Tabela 3.1 - Matéria-prima utilizada no processo de mistura e suas principais funções.

Matéria-prima	Exemplos	Principais Funções
Polímero	Polímero Natural ou Sintético	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumentar a elasticidade, durabilidade e absorção de energia; ▪ Fornecer estanquicidade.
Enchedor	De Reforço: Negro de fumo, Sílica Não Reforço: Carbonato de cálcio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ De Reforço: No composto não vulcanizado ajuda a reduzir a viscosidade do polímero durante a mistura; No composto vulcanizado permite o aumento da resistência à fratura, fadiga, desgaste e abrasão; ▪ Não Reforço: reduzir o custo do material e melhorar a estanquidade ao ar.
Auxiliar de Processamento	Óleos, Ácidos Gordos, Promotores de adesividade e Plastificantes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Melhorar a dispersão durante a mistura; ▪ Reduzir a viscosidade do composto; ▪ Controlar o nível de aderência da borracha processada.
Agente de vulcanização	Ativador (silano), Enxofre, Acelerador e Retardador	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ativador: Formar complexos com os aceleradores; ▪ Enxofre: Reagir com o polímero para criar reticulações entre cadeias de polímero; ▪ Acelerador e Retardador: Controlar a velocidade da reação de reticulação.
Outros materiais diversos	Resinas reforçantes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumentar a adesão entre a borracha e o metal e entre a borracha e o tecido têxtil.

3.3. Processo de Mistura

A produção de um composto é um processo em *batch* extremamente complexo no qual é necessário controlar com rigor as diferentes variáveis do processo de acordo com a especificação de mistura. Este controlo é realizado através do programa *Mixing Management System, MMS*, que monitoriza, entre outros, os seguintes parâmetros:

- Temperatura de mistura;
- Temperatura dos circuitos de recirculação de água no misturador;
- Velocidade de rotação dos rotores;
- Torque dos rotores;
- Tempo de mistura;
- Fator de enchimento.

Do mesmo modo é fundamental haver um controlo rigoroso na pesagem das matérias-primas para garantir condições de reprodutibilidade. O processo de mistura normalmente está dividido numa série de etapas, cada uma com parâmetros diferentes. Na **Figura 3.5** demonstra-se a variação da temperatura do composto e do torque exercido pelos rotores em função do tempo, num processo típico de mistura.

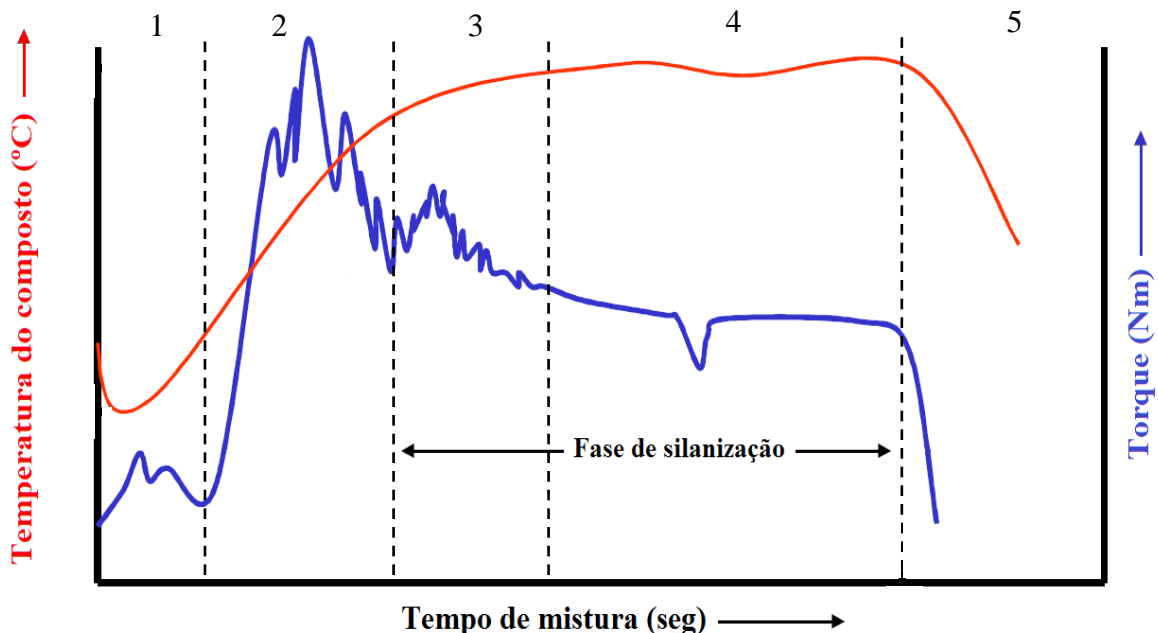


Figura 3.5 - Variação da temperatura do composto e do torque exercido pelo motor em função do tempo num processo típico de mistura [8].

De acordo com a **Figura 3.5** é possível distinguir essencialmente 5 etapas:

- Etapa 1: Início do processo de mistura onde ocorre o carregamento dos polímeros e enchedores no misturador;
- Etapa 2: Incorporação dos enchedores nos polímeros. Nesta fase verifica-se um aumento súbito da força exercida pelo motor na carga devido à descida do martelo pneumático. Esta descida comprime a carga sólida entre o martelo e os rotores, gera elevadas forças de atrito e tensões de cisalhamento no composto aumentando assim a sua temperatura;
- Etapa 3: Carregamento de óleos e início da silanização. Após a incorporação dos enchedores sucede a dispersão do composto, que é facilitada pela redução da viscosidade devido à adição de matéria-prima no estado líquido;
- Etapa 4: Fim da dispersão do composto e fase de silanização. Concluída a dispersão, como se pode ver pela diminuição e estabilização do torque, esta etapa denominada de “*Plateau*” tem como objetivo manter o composto a uma temperatura constante de modo a controlar a reação química de silanização. A súbita variação do torque é causada por uma momentânea subida e descida do martelo;
- Etapa 5: Descarga do composto.

A silanização é um processo que decorre quando se utiliza enchedores de sílica e tem como objetivo promover a sua união com o polímero. Contudo, devido à diferença de polaridades, a capacidade de ligação entre a borracha e a sílica é muito reduzida tornando o processo de mistura bastante difícil. Para auxiliar esta ligação é usado um material especial – o Silano – que funciona como agente ativador da ligação. A estrutura do silano confere-lhe duas funcionalidades importantes: estabelecer a reação com a superfície da sílica durante o processo de mistura – silanização - e assegurar a reação com o polímero durante a vulcanização [8].

- *Masticação*: redução da viscosidade apenas do polímero;
- *Remill* (Remistura): redução da viscosidade do composto;
- *Master Batch*: incorporação, dispersão e homogeneização dos enchedores e óleos nos polímeros, através de um processo de mistura com elevadas tensões de cisalhamento e uma temperatura elevada de descarga do composto;

- *Final Mix*: distribuição dos agentes de vulcanização no composto, através de um processo de mistura com baixas tensões de cisalhamento e uma temperatura de descarga do composto mais baixa, para evitar a vulcanização durante a mistura.

Finalmente é essencial referir que a produção de uma determinada quantidade de composto é dividida em vários *batches*, normalmente entre 10 a 100 *batches* por composto.

3.4. Misturador *Single* e *Tandem*

A maioria dos compostos passam por um processo de *Master Batch* seguido de *Final Mix*, podendo estes ser realizados em misturadores *Single* ou misturadores *Tandem*: o primeiro tem uma câmara de mistura por isso apenas pode realizar 1 processo de cada vez, enquanto que o segundo tem duas câmaras por isso pode realizar os dois processos em contínuo. De facto, a invenção da tecnologia de misturadores *Tandem* – **Figura 3.6** -

trouxe uma série de vantagens para a indústria dos pneus, tais como:

- Permitiu um aumento da capacidade produtiva, pelo facto de não haver a necessidade de armazenar o composto temporariamente entre cada processo;
- Permitiu uma melhor dispersão e homogeneização do composto. A câmara superior está otimizada para desempenhar uma melhor dispersão pois tem um volume menor e está equipada com um martelo que comprime a carga; a câmara inferior está otimizada para desempenhar uma melhor homogeneização pois tem maior volume e não está equipada com martelo.

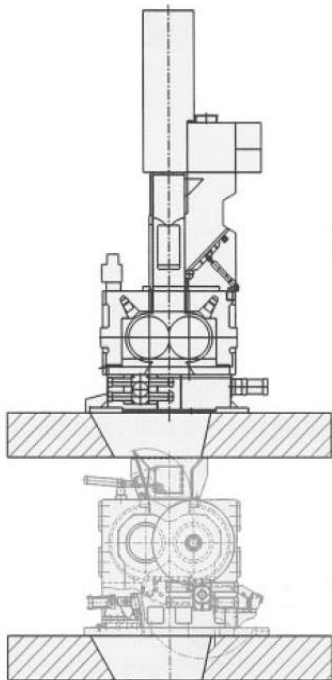


Figura 3.6 - Misturador *Tandem* [22].

3.5. Linha de mistura

Concluído o processo de mistura, o composto segue pela linha de mistura onde percorre uma série de equipamentos até o seu armazenamento. Como se pode ver na **Figura 3.7**, o composto misturado passa inicialmente por uma extrusora e moinhos de rolos donde resulta uma folha de borracha plana calandrada; de seguida é arrefecido por imersão num líquido específico que cria na folha uma camada externa de baixa adesividade, para facilitar o armazenamento, e é seco e arrefecido em ventoinhas de arrefecimento. Finalmente segue para uma máquina de paletização onde o filme é dobrado sobre paletes para ser armazenado.

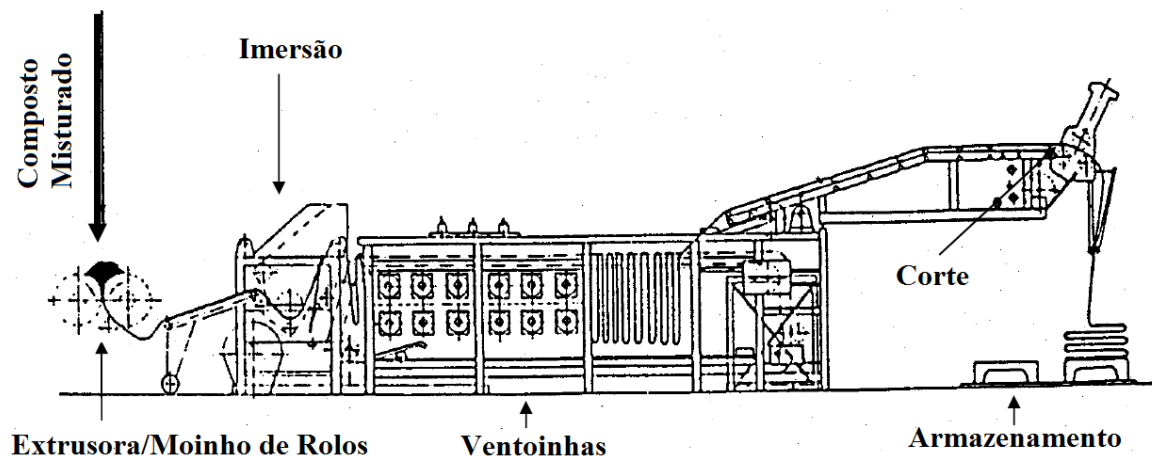


Figura 3.7 - Linha do setor de misturação [8].

O setor de mistura é composto por 11 linhas, enumeradas de #0 a #11, distinguindo-se 8 misturadores *Single* – da #0 à #7 - e 3 misturadores *Tandem* – da #9 à #11.

3.6. Unidade de Controlo de Temperaturas

Os benefícios do controlo de temperatura do misturador durante o processo de mistura, invés de simplesmente recircular água no seu interior, são amplamente aceites. O controlo é realizado por Unidades de Controlo de Temperatura, mais conhecidas como TCUs, em 4 zonas do misturador – corpo, rotores, porta de descarga e martelo pneumático – sendo que cada zona tem o seu circuito independente de recirculação de água e de

controlo de temperatura. É também regulada a temperatura da extrusora e dos moinhos para controlar a aderência da borracha aos rolos durante o processo de calandragem. É essencial que o sistema de controlo tenha as seguintes características:

- Permitir uma temperatura ajustável da água de recirculação, entre 20 °C e 80 °C;
- Cada zona tem que ter um caudal de água suficiente para que a variação de temperatura ao longo do seu circuito não seja superior a 2 °C, de modo a evitar gradientes de temperatura na máquina que a podem danificar a longo prazo;
- O sistema tem de ser capaz de manter a temperatura de recirculação definida pelo processo, denominado de *setpoint* de temperatura, sendo admitidas variações máximas de ± 5 °C face a esse valor de referência.

Cada linha de mistura é então constituída por 2 a 3 TCUs, tendo cada uma entre 3 a 4 zonas de controlo de temperatura. Pode-se analisar a linha #11 que tem a seguinte distribuição:

- TCU da Câmara Superior: Corpo, rotor e porta/martelo;
- TCU da Câmara Inferior: Corpo, rotor e porta;
- TCU da Calandra: Sem-fim, corpo, rolo superior e rolo inferior.

Como é possível observar na **Figura 3.8**, cada zona é constituída por 1 permutador de placas, 1 bomba centrífuga, 1 resistência elétrica *On/Off* e 1 válvula de controlo pneumática; o permutador é responsável pela troca de calor entre a água fria proveniente das torres de arrefecimento, geralmente a 21 °C, e a água de recirculação da zona respetiva; existem também 2 medidores de temperatura que medem as temperaturas de

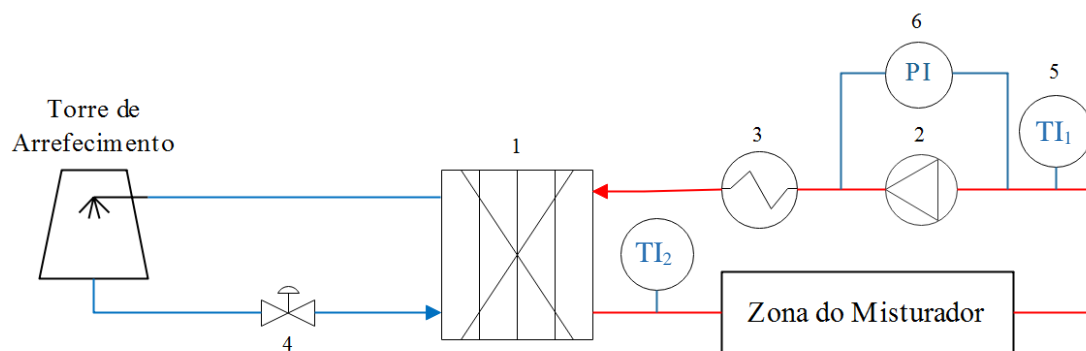


Figura 3.8 - Esquema da TCU para uma zona do misturador #11

Legenda

- 1 - Permutador de placas
- 2 - Bomba centrífuga
- 3 - Resistência elétrica *On/Off*

- 4 - Válvula de controlo pneumática
- 5 - Indicador de temperatura
- 6 - Indicador de pressão

entrada e saída da corrente de recirculação, TI_1 e TI_2 , do permutador e 1 indicador da diferença de pressão entre a entrada e saída da bomba. O controlo de temperatura é realizado por um controlador proporcional integral derivativo, PID, tendo como variável controlada a temperatura de saída do misturador, TI_1 , e como variáveis manipuladas o caudal da corrente de arrefecimento, o caudal da corrente de recirculação e o calor gerado pela resistência. Na **Figura 3.9** é ilustrada uma representação da TCU da câmara superior do misturador #11 com as respetivas zonas de controlo e equipamentos de medição disponíveis. Todas as TCU existentes apresentam uma estrutura de funcionamento semelhante.

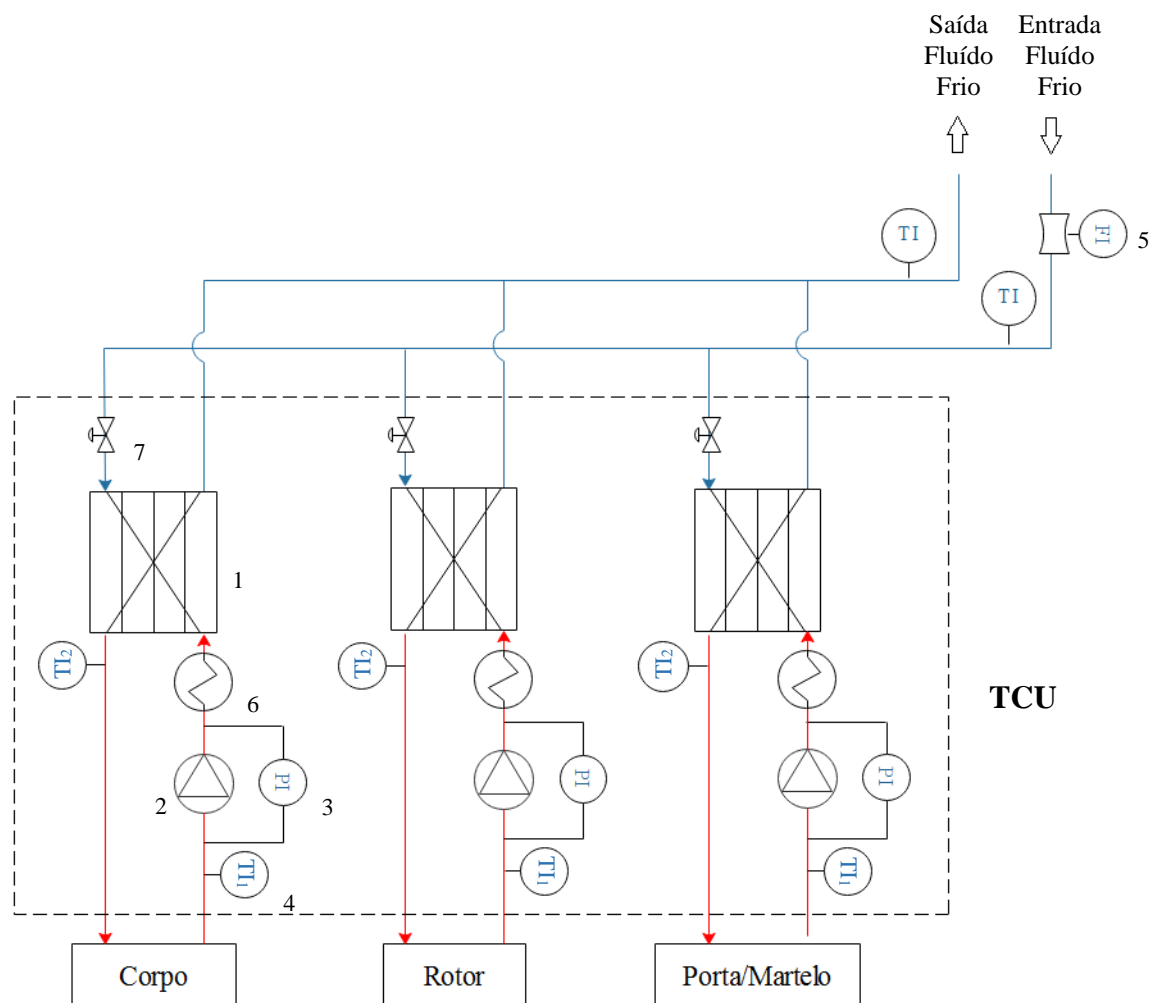


Figura 3.9 - Esquema da TCU da câmara superior do Misturador #11.

Legenda

- | | |
|------------------------------|----------------------------------------|
| 1 - Permutador de placas | 5 - Indicador de caudal volumétrico |
| 2 - Bomba centrífuga | 6 - Resistência elétrica <i>On/Off</i> |
| 3 - Indicador de pressão | 7 - Válvula de controlo pneumática. |
| 4 - Indicador de temperatura | |

Perante as necessidades do processo pode ser necessário variar a temperatura de uma zona específica, atuando o sistema de controlo da seguinte forma:

- **Aquecimento:** Caso a temperatura TI_1 medida seja inferior ao seu *setpoint*, então a válvula de controlo pneumática fecha totalmente e a corrente de recirculação é aquecida pela resistência até que TI_1 atinja o *setpoint*;
- **Arrefecimento:** Caso a temperatura TI_1 medida seja superior ao seu *setpoint*, então a válvula de controlo pneumática varia o caudal da corrente de arrefecimento, aumentando a troca de calor no permutador, até que TI_1 atinja o *setpoint*. No caso dos misturadores #0 ao #7 esta variação de caudal é feita através de uma válvula pneumática *On/Off* do tipo globo – **Figura 3.10. A** - e nos misturadores #9 ao #11 é realizado através de uma válvula pneumática do tipo globo com posicionador – **Figura 3.10. B.1 e B.2**;
- **Controlo de caudal quente:** Caso a diferença de temperaturas entre TI_1 e TI_2 seja superior a 2 °C então o controlador atua na bomba e varia o caudal de recirculação, de modo a evitar gradientes de temperatura na máquina que a podem danificar a longo prazo.

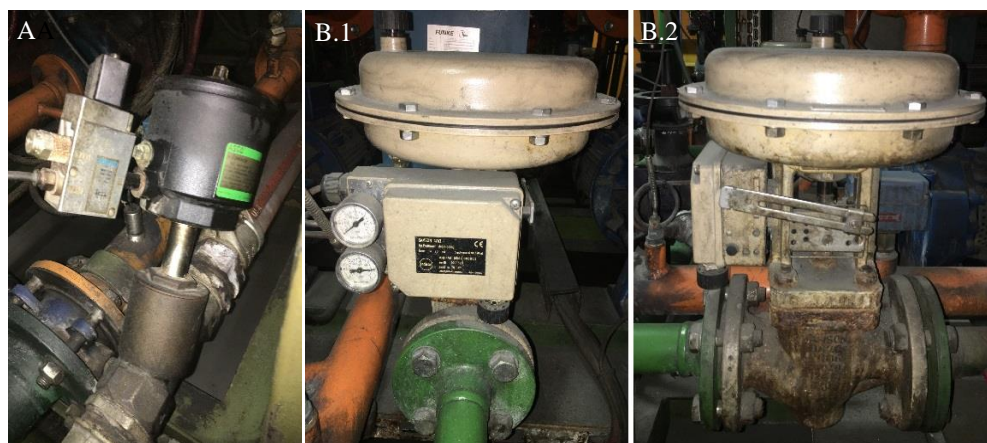


Figura 3.10 - A: Válvula pneumática *On/Off* do tipo globo; B.1: Válvula pneumática do tipo globo com posicionador (vista frontal); B.2: Válvula pneumática do tipo globo com posicionador (vista lateral).

Atualmente as temperaturas de recirculação estão padronizadas por misturador e não por processo apresentando valores típicos de 40 °C para o corpo e rotores e 70 °C para a porta de descarga e martelo. Relativamente à extrusora e moinhos, as suas temperaturas variam em função da aderência da borracha aos rolos durante calandragem, sendo o operador da máquina quem as define. Nas unidades dos misturadores, apesar deste sistema de controlo estar preparado para situações de aquecimento, a sua principal função é garantir o arrefecimento do misturador devido à elevada quantidade de calor gerado na compressão do composto entre o martelo e os rotores em movimento. Quanto ao seu funcionamento a **Figura 3.11** apresenta o Diagrama *P&ID* de uma determinada zona.

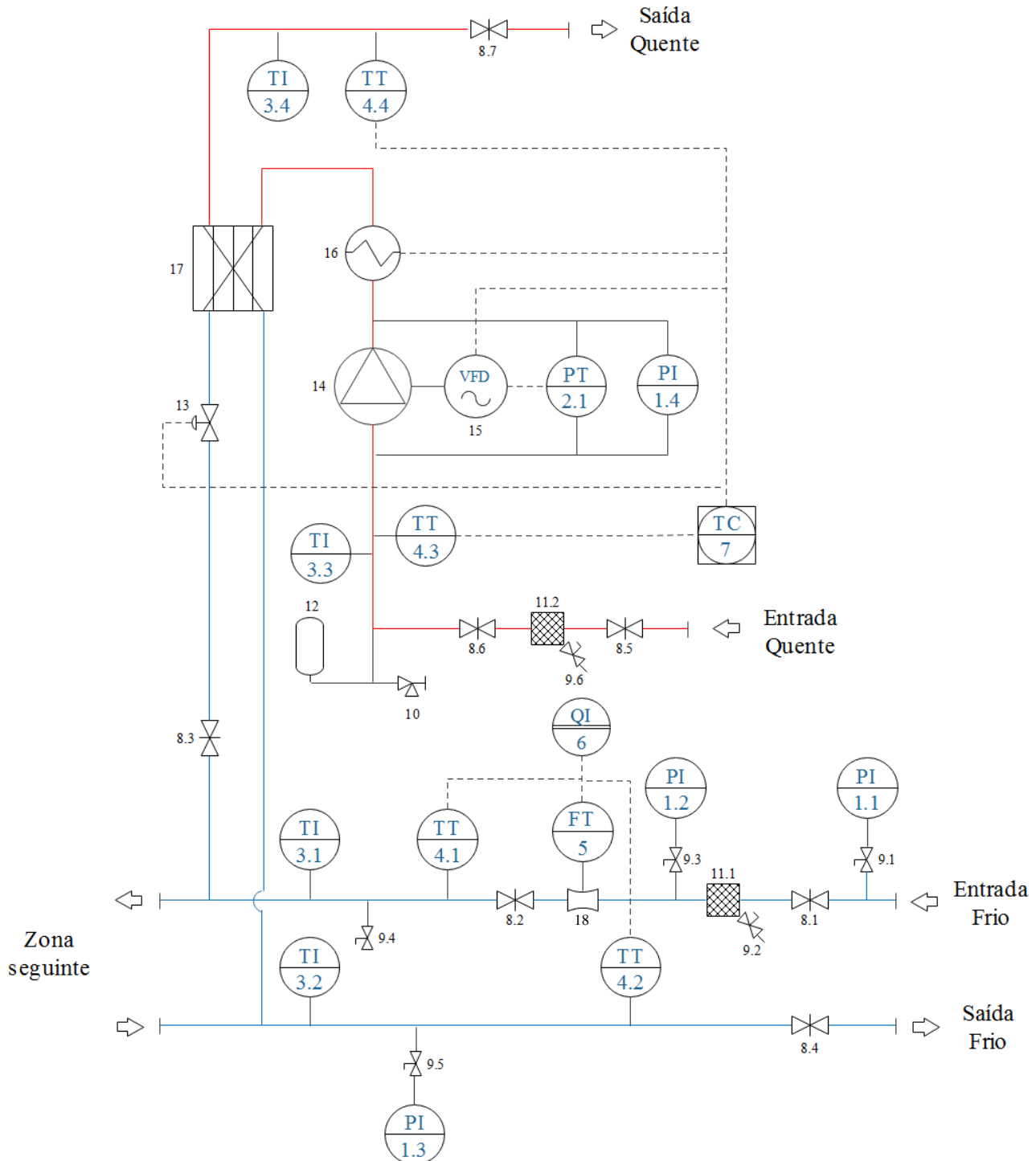


Figura 3.11 - Diagrama *P&ID* de uma zona do misturador.

Legenda

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 – Indicador de pressão | 9 – Válvula de paragem manual |
| 2 – Transmissor de pressão | 10 – Válvula de segurança |
| 3 – Indicador de temperatura | 11 – Filtro |
| 4 – Transmissor de temperatura | 12 – Tanque de expansão |
| 5 – Transmissor de caudal | 13 – Válvula de controlo pneumática |
| 6 – Indicador de calor transferido | 14 – Bomba centrífuga |
| 7 – Controlador de temperatura | 15 – Variador de frequência |
| 8 – Válvula de paragem | 16 – Resistência elétrica <i>On/Off</i> |
| | 17 – Permutador de placas |
| | 18 – Medidor de caudal |

4. Condições operatórias atuais

Neste capítulo efetua-se um levantamento energético do setor de mistura e das condições operatórias atuais das Unidades de Controlo de Temperatura relativamente aos seguintes parâmetros: caudal de recirculação, análise de perdas térmicas nas tubagens e permutadores e funcionamento das válvulas de controlo e resistências de aquecimento.

A recolha de dados foi feita através da ferramenta *MessDas*, que é um sistema de gestão de energia que permite acompanhar de forma pormenorizada os consumos energéticos dos diversos setores e respetivos equipamentos. A principal identificação de problemas e implementação de medidas de otimização foi realizada nas linhas #10 e #11, pelo facto da Continental Mabor pretender adquirir misturadores idênticos a estes no futuro. Foi também determinado o consumo energético nas TCUs dos misturadores das linhas #5, #6 e #7.

Este levantamento foi efetuado durante uma parte do trabalho de mestrado entre os meses de Fevereiro a Abril do ano de 2019.

4.1 Consumo energético no setor de mistura

Atualmente o setor de mistura apresenta um consumo médio de 20 MWh e é responsável por aproximadamente 34% do consumo elétrico total da fábrica, variando entre 31 e 42%, como é possível constatar das **Figuras 4.1 e 4.2**.

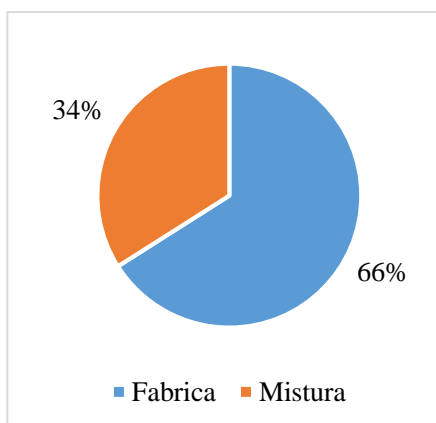


Figura 4.2 - Impacto do setor da mistura no consumo elétrico total da fábrica.

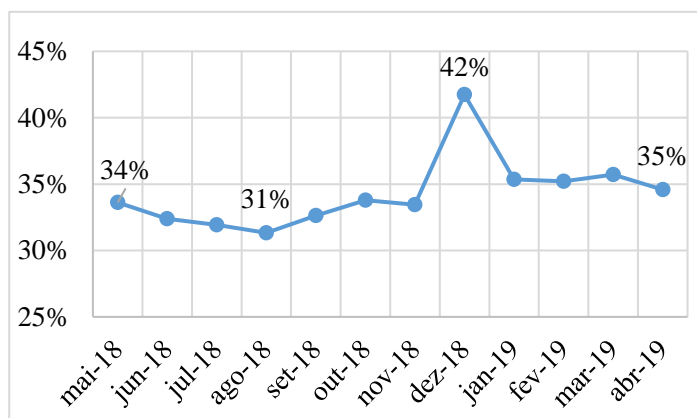


Figura 4.1 - Evolução do consumo do setor da mistura relativamente ao consumo elétrico total da fábrica.

As percentagens dos consumos energéticos dos vários equipamentos das linhas #10 e #11 apresentam-se nas **Figuras 4.3 e 4.4**. Estes dados foram retirados do *MessDas* e estão presentes no **Anexo B.1**.

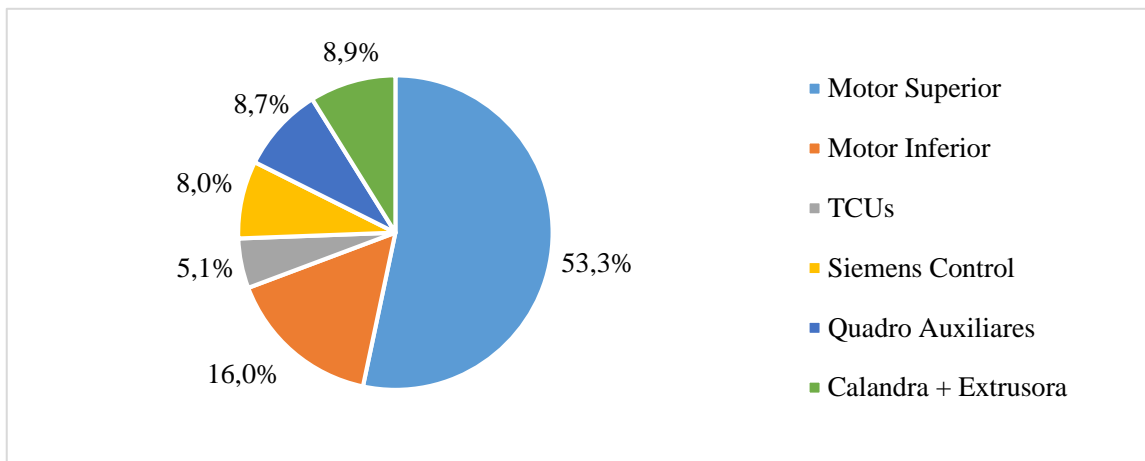


Figura 4.3 - Percentagem, %, de consumo dos principais equipamentos da linha #10 nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2019.

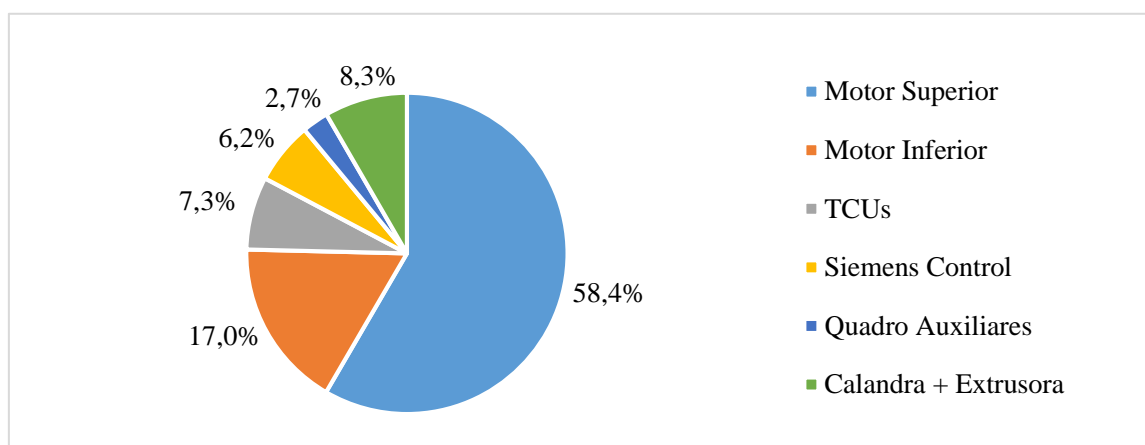


Figura 4.4 - Percentagem, %, de consumo dos principais equipamentos da linha #11 nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2019.

Face aos dados recolhidos é possível verificar que os grandes consumidores energéticos são os motores dos misturadores, representando até 75% do consumo total. As TCUs correspondem a apenas 5,1% e 7,3% nas linhas #10 e #11, mas, em termos absolutos, traduzem consumos médios mensais de 26,4 MWh e 65,5 MWh, respetivamente. Estes consumos encontram-se no **Anexo B.1**.

4.2 Avaliação do funcionamento do sistema de controlo

4.2.1 Caudal de recirculação

Para ser possível a realização dos balanços de energia ao sistema de controlo foi necessário determinar os caudais volumétricos de água dos circuitos do misturador. As bombas centrífugas presentes nas TCUs dos misturadores #10 e #11 são do tipo *ETABLOC GN 032-125* com diâmetros impulsores de 118 e 120 mm, respetivamente, e estão equipadas com um variador de frequência que regula a velocidade de rotação do impulsor da bomba e, assim, o caudal fornecido.

Para a bomba de diâmetro 118 mm, de acordo com as leis de afinidade e com as curvas da bomba apresentadas no **Anexo A.1**, foi possível obter as curvas específicas da bomba para diferentes frequências de rotação. A curva teórica do sistema foi obtida através da determinação experimental do ponto de operação na frequência de 50 Hz, e os restantes pontos dessa curva foram determinados pelas leis de afinidade. Isto permitiu a construção da curva teórica do sistema - **Figura 4.5** - de onde é possível retirar o caudal de recirculação para qualquer frequência de rotação entre 25 Hz e 50 Hz. Os cálculos efetuados para a determinação destas curvas, e para os da bomba centrífuga de diâmetro de impulsor de 120 mm, encontram-se no **Anexo A.1**.

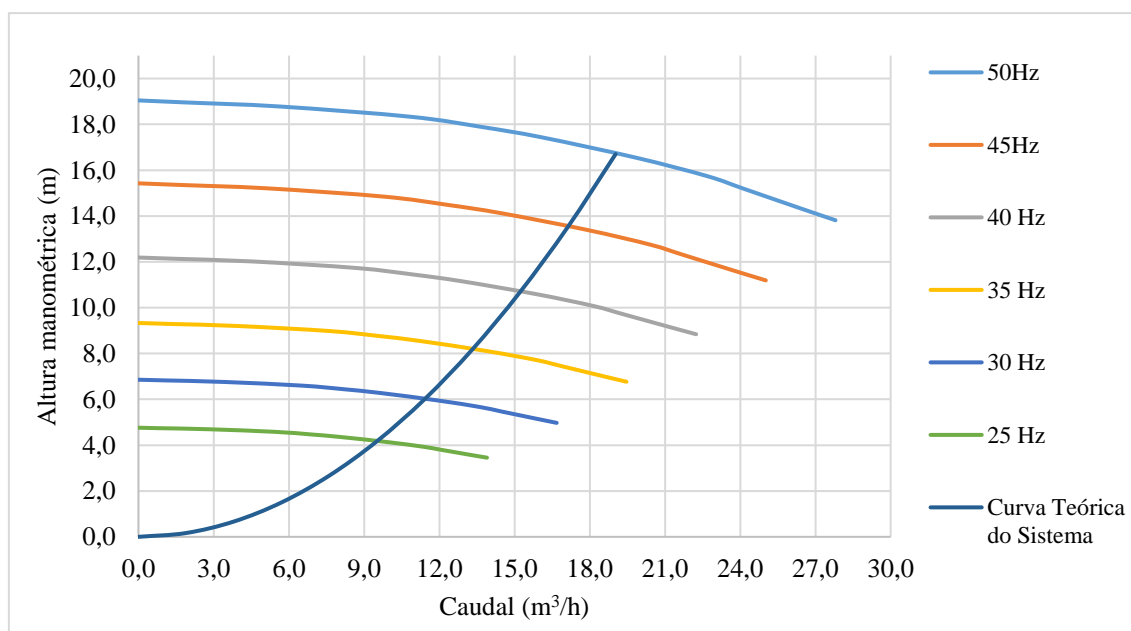


Figura 4.5 – Curvas da bomba ETABLOC GN 032-125-φ118 mm para diferentes frequências de rotação e respetiva curva teórica do sistema, num determinado circuito do misturador #10.

Para efeitos de validação da curva teórica do sistema foram também efetuadas medições da diferença de pressão na bomba em função de diferentes frequências de rotação num determinado circuito e, como se pode ver no **Anexo A.1**, a proximidade entre as duas curvas obtidas permitiu concluir que as leis de afinidade são validas para prever corretamente o caudal de circulação.

Nas TCUs do misturador 10 verificou-se um caudal máximo e mínimo de 18,5 m³/h e 9 m³/h. No misturador 11, sendo o diâmetro do impulsor da bomba 120 mm, verificou-se um caudal máximo e mínimo de 21 m³/h e 10 m³/h, respetivamente.

4.2.2 Perdas de calor nas tubagens

Para o correto funcionamento do processo de mistura é essencial que cada zona do misturador esteja à temperatura definida. Contudo, as TCUs apenas possuem medidores de temperatura à entrada e saída do permutador de placas, não sendo possível saber a temperatura exata da corrente de recirculação à entrada do misturador, devido às trocas de calor com o ar durante o seu percurso pelas tubagens. Sendo assim, o passo a seguinte foi a determinação das perdas de calor teóricas por convecção e radiação nas tubagens, para poder avaliar a diferença entre a temperatura lida e a correspondente à entrada do misturador.

Como referido anteriormente na **secção 3.6**, cada TCU tem entre 3 a 4 circuitos, sendo que cada um opera com caudais diferentes, a temperaturas diferentes e com tubagens distintas. Desta forma, em vez de se calcularem, as perdas de calor em todas as situações possíveis, determinaram-se apenas para a situação correspondente à perda de calor máxima e mínima. As condições assumidas tiveram em conta os seguintes critérios:

- Diâmetro externo e comprimento da tubagem: quanto maiores forem estes parâmetros, maior será a área de transferência de calor e, portanto, maiores serão as perdas térmicas;
- Temperatura de saída do permutador: quanto maior for esta temperatura maiores serão as perdas;
- Caudal de circulação: não afetará as perdas porque a resistência dominante está do lado ar. No entanto para o mesmo valor de perdas térmicas, e tendo em

consideração o balanço de energia a esta corrente, se o caudal de água diminuir a variação de temperatura da corrente será maior.

De acordo com estes critérios, os valores obtidos para as perdas de calor, nos circuitos de recirculação das TCUs, referentes aos misturadores #10 e #11 são apresentados na **Tabela 4.1**. As características das tubagens e os cálculos das perdas de calor estão presentes no **Anexo A.2**.

Tabela 4.1 – Perdas de calor máximas e mínimas nos circuitos de recirculação das TCUs para os misturadores #10 e #11.

	Diâmetro externo (mm)	Comprimento (m)	Caudal (m ³ /h)	Temperatura de saída do permutador (°C)	Temperatura de entrada no Misturador (°C)	Diferença de Temperatura (°C)	Perdas (kW)
Perda mínima	60,3	25	21	40 ± 0,1	39,9 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,5
Perda máxima	73	40	9	70 ± 0,1	69,7 ± 0,1	0,3 ± 0,1	3,8

Analisando a **Tabela 4.1** verificaram-se variações reduzidas de temperatura, entre $0,1 \pm 0,1$ °C e $0,3 \pm 0,1$ °C, certamente devido ao elevado caudal de circulação. De facto, de acordo com cálculos efetuados, para se obter uma variação de temperatura de 2 °C (valor a partir do qual podem ocorrer danos nas máquinas) nas condições de perda máxima, assumindo que as dimensões das tubagens se mantêm fixas, seria necessário um caudal de 1 m³/h ou inferior, algo impossível de acontecer neste processo. De acordo com os valores apresentados, as perdas de calor nas tubagens de circulação das TCUs foram então consideradas desprezáveis.

4.2.3 Análise dos permutadores

O passo seguinte passou por analisar o grau de isolamento dos permutadores de placas, comparando a variação de entalpia do fluido quente - corrente de recirculação - e do fluido frio - corrente de arrefecimento. Na **Figura 4.6** apresentam-se duas visualizações do painel de controlo da TCU: à esquerda, as temperaturas da corrente quente de cada circuito, nomeadamente a temperatura de entrada no permutador – *recirc.*

– a temperatura de saída – *forw.* – e o *setpoint* de temperatura – *setp.*; à direita, a variação de temperatura.



Figura 4.6 - Painel de Controlo da TCU.

Deste modo foi possível determinar a potência cedida instantaneamente por cada corrente quente. Relativamente à corrente fria, como se pode observar no esquema da TCU apresentado na **Figura 3.9**, os medidores de temperatura e de caudal estão instalados nas tubagens gerais de alimentação e retorno das torres de refrigeração, não sendo possível determinar o caudal e temperaturas de cada zona. Por este motivo comparou-se o calor total cedido nos permutadores com o calor total recebido pela água fria. É importante referir que os ensaios foram realizados em condições de estado-estacionário, durante um processo em que a bomba trabalhava no caudal máximo.

Na **Figura 4.7**, contruída a partir das tabelas presentes no **Anexo B.2**, representa-se a relação entre a potência térmica do fluido quente e do fluido frio. Como se pode constatar as potências apresentam valores próximos, obtendo-se de facto eficiências na transferência de calor entre 82,5% e 92,8%. A mesma situação ocorre em todas as TCUs das linhas #10 e #11, podendo-se assim concluir que os permutadores são praticamente adiabáticos.

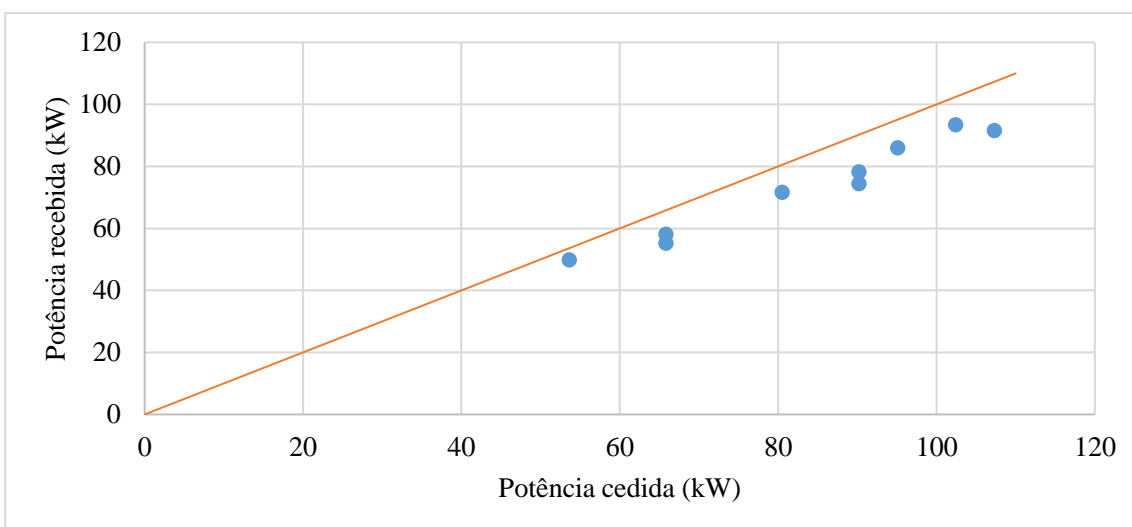


Figura 4.7 - Gráfico relativo à Potência recebida em função da Potência cedida na TCU da câmara inferior do misturador 11.

4.2.4 Análise das válvulas de controlo, resistências e parâmetros PID

Tal como referido na **secção 3.6**, o controlo de temperatura das correntes de recirculação é realizado por um controlador PID por meio da manipulação de uma válvula de controlo pneumática, no caso de arrefecimento, e de uma resistência elétrica, no caso de aquecimento, sendo então essencial que estes equipamentos funcionem corretamente. Após um levantamento das condições de operação atuais, verificou-se a existência de alguns problemas, nomeadamente na incapacidade de algumas correntes atingirem o *setpoint* definido e nas configurações inadequadas do controlador.

Setpoints

Numa situação ideal, durante o aquecimento de uma corrente de recirculação, a resistência elétrica é ligada e a válvula de controlo fecha totalmente, até 0 bar, permitindo apenas a passagem de um caudal mínimo de água de arrefecimento de aproximadamente 1,5 m³/h. Esta situação é possível observar na **Figura 4.8**.



Figura 4.8 - Correto funcionamento das válvulas de controlo pneumático com posicionador durante o aquecimento da corrente (1 - Pressão de saída; 2 - Pressão de entrada).

Contudo, verificou-se que certas válvulas deste tipo estavam danificadas e não fechavam corretamente devido a um problema de entrada de óleo no sistema de ar comprimido. Assim a pressão de saída mínima variava entre os 0,5 e 1 bar, que correspondia a um caudal mínimo de 10 a 15 m³/h. Isto impedia que as correntes de recirculação atingissem a temperatura pretendida, porque, apesar das resistências estarem ligadas, a troca de calor no permutador, promovida pelo elevado caudal de água fria, iria arrefecer novamente as correntes de recirculação. Deste modo, ocorreram situações em que as resistências permaneciam ligadas 24 horas por dia, originando um consumo excessivo de energia. Devido ao problema já referido de entrada de óleo no sistema de ar comprimido, houve certas válvulas que avariaram, não abrindo nem fechando quando eram atuadas pelo controlador.

Noutras situações a temperatura *setpoint* não era atingida porque várias resistências tinham os seus relés queimados, impedindo o seu funcionamento quando necessário. No **Anexo B.4** apresenta-se a potência medida de todas as resistências das TCUs das linhas #10 e #11, no mês de Abril de 2019.

Configurações do controlador

Outro dos problemas que se observou foi a precisão desnecessária e até prejudicial do sistema de controlo. Apesar de estar definido como critério da empresa que variações máximas de ± 5 °C na temperatura da corrente de recirculação, face ao seu *setpoint*, não afetam o processo de mistura - **secção 3.6** - o sistema apresentava uma banda morta de 1 °C. Nesta banda, o controlador considera que a temperatura controlada está correta desde que não varie ± 1 °C relativamente ao *setpoint* definido e apenas atua para a manter situada nesta banda. Por este motivo, e pelo facto de os parâmetros do controlador PID apresentarem os valores de defeito e não estarem otimizados de acordo com o processo, o sistema de controlo tinha um comportamento do tipo *On/Off*, como é possível observar na **Figura 4.9**.

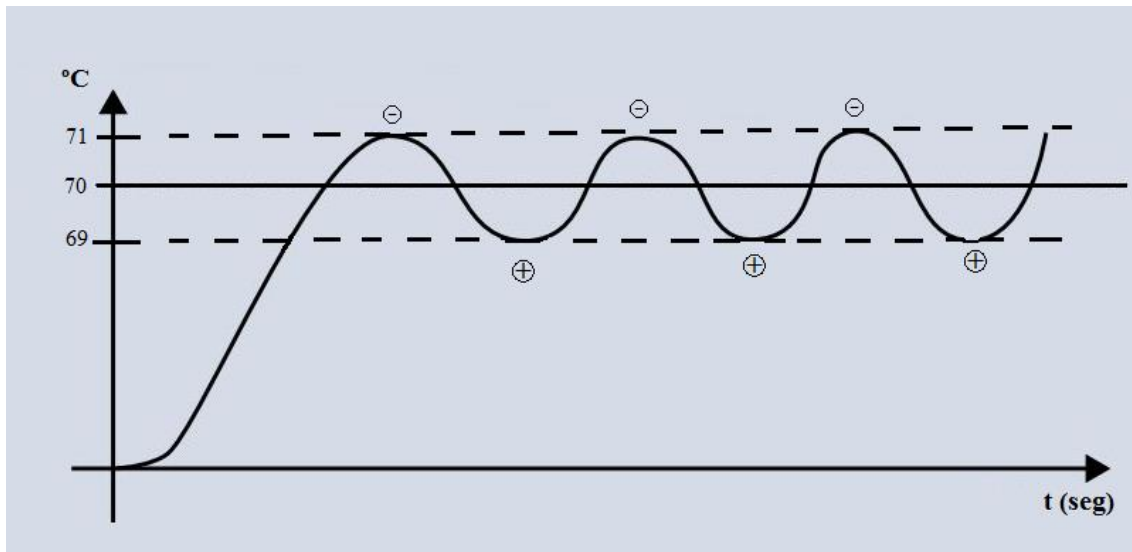


Figura 4.9 - Gráfico representativo da instabilidade no controlo de temperatura da corrente da TCU para uma banda morta de 1 °C. ⊕ : Resistência ligada, válvula fechada; ⊖ : Válvula aberta, resistência desligada.

Quando a corrente de recirculação atingia os 71 °C, a válvula pneumática abria e permitia o arrefecimento dessa corrente. Contudo, este arrefecimento era demasiado - devido a um elevado ganho proporcional do controlador que resultava numa abertura exagerada da válvula pneumática - e rapidamente a resistência era ligada para o compensar, até que atingisse novamente os 71 °C, repetindo este ciclo ao longo de todo o processo. Isto tinha como consequência o contínuo ligar e desligar da resistência elétrica contribuindo assim para um aumento desnecessário do consumo de energia.

4.3 Consumo energético nos TCUs

Face aos problemas apresentados na **secção 4.2.4** deste capítulo, efetuou-se um levantamento do consumo energético das TCUs das linhas #10 e #11 através do programa *MessDas*. Foi possível também determinar o consumo das TCUs dos misturadores *single* das linhas #5, #6 e #7 que, apesar de não emparelhadas com o *MessDas*, têm um contador local da energia elétrica sendo possível calcular o seu consumo ao longo do tempo. Assim sendo, nesta secção será apresentada a evolução da potência média mensal das TCUs, não considerando para a média os períodos de não funcionamento. É importante referir

também que estas unidades têm 3 zonas de controlo no misturador, sendo estas: corpo, rotor e porta/martelo.

As TCUs têm essencialmente 2 grandes consumidores de energia elétrica: as bombas centrífugas e as resistências elétricas. As bombas estão sempre ligadas e apresentam uma potência média entre 3 a 5 kW, sendo então esta a potência mínima de cada TCU. A restante potência diz respeito ao consumo elétrico das resistências.

4.3.1 Linhas #10 e #11

Na **Figura 4.10** apresenta-se a evolução da potência média mensal das TCUs do misturador #10 entre os meses de Fevereiro de 2018 e Abril de 2019.

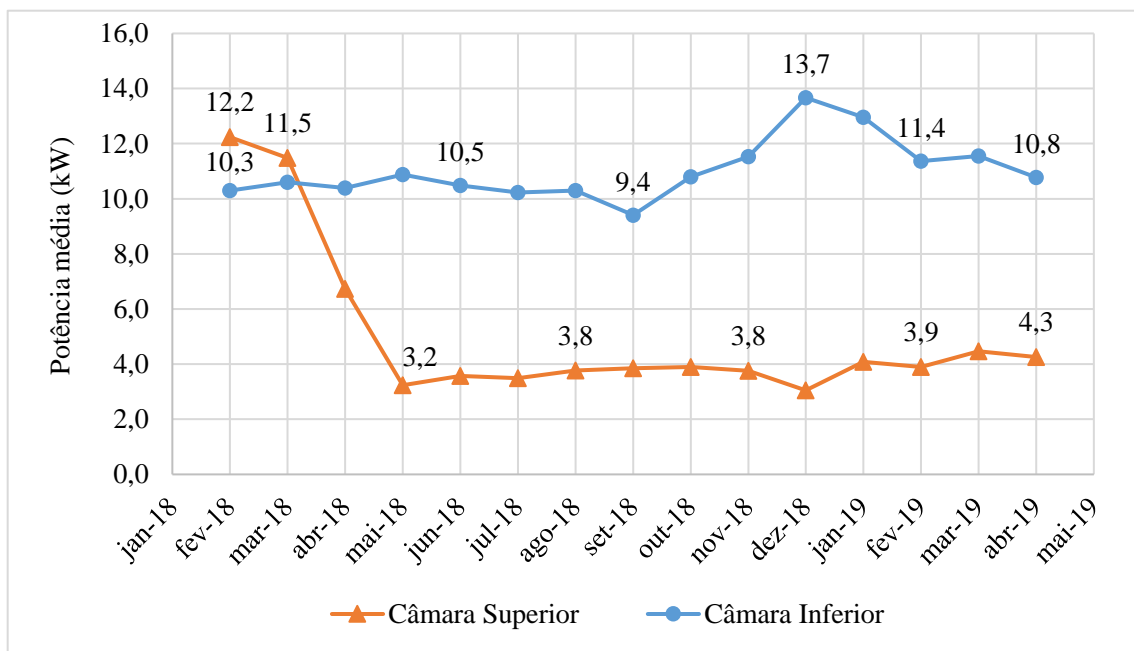


Figura 4.10 - Potência média das TCUs do misturador da linha #10 entre os meses de Fevereiro de 2018 e Abril de 2019.

Pela análise desta figura foi possível observar de imediato que, no caso da câmara superior, entre os meses de Março e Maio de 2018 houve uma diminuição súbita da potência consumida, de 11,5 kW para 3,2 kW, permitindo deduzir que, a partir desse momento, apenas as bombas consumiram energia, permanecendo esta TCU até ao mês de Abril de 2019 com uma potência média de 3,8 kW. No caso da câmara inferior registou-se uma potência média de 11,2 kW.

Em Abril de 2019 mediu-se a potência útil das resistências e bombas centrífugas das linhas #10 e #11 e verificou-se que todos os circuitos das TCUs do misturador #10, à exceção do circuito da porta da câmara inferior, tinham as suas resistências avariadas. Esta informação encontra-se no **Anexo B.4**. De igual modo, no programa *MMS* confirmou-se que durante este período realizaram-se processos de mistura nos quais as temperaturas de recirculação não eram atingidas. Assim sendo, concluiu-se que no caso da câmara superior as resistências avariaram durante o mês de Abril de 2018.

A seguir, na **Figura 4.11** apresenta-se a evolução da potência média mensal das TCUs do misturador #11 entre os meses de Abril de 2018 e Abril de 2019.

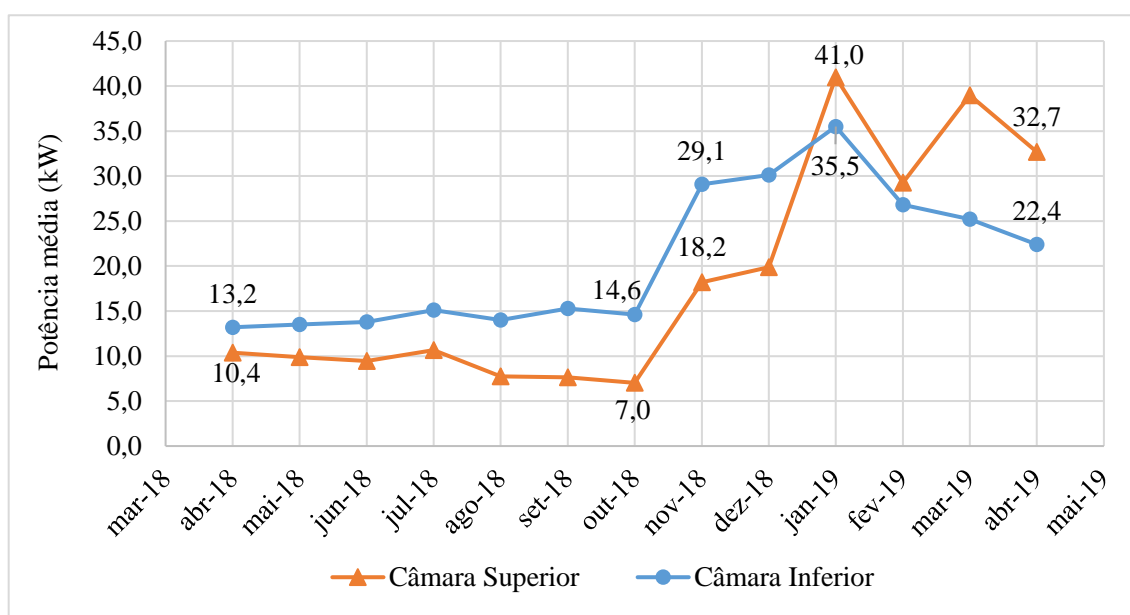


Figura 4.11 - Potência média das TCUs do misturador da linha #11 entre os meses de Abril de 2018 e Abril de 2019.

Durante os meses de Abril e Outubro de 2018 registou-se uma potência média de 9,4kW na câmara superior e 14,3 kW na câmara inferior. No mês de Novembro do mesmo ano a Engenharia I procedeu à reparação das resistências destes circuitos, o que, devido ao problema do elevado caudal mínimo de arrefecimento, criou situações em que as resistências estariam ligadas várias horas seguidas, justificando o aumento significativo do consumo nesse mês.

Nos meses seguintes, até Abril de 2019, a câmara inferior manteve um consumo médio de 28,4 kW, contudo na câmara superior verificou-se um segundo aumento considerável no mês de Janeiro de 2019, passando a apresentar uma potência média de 35,5 kW até Abril desse ano. Este aumento foi devido ao controlo manual de certas válvulas pneumáticas que estavam danificadas e que não abriam nem fechavam

automaticamente quando atuadas pelo sinal do controlador. Contudo este controlo era contraproducente, porque não só estas válvulas permaneciam abertas durante vários dias, como também o caudal de arrefecimento era demasiado elevado quando abertas manualmente. Isto foi possível confirmar através do cruzamento dos dados dos programas *MMS* e *MessDas*: no mesmo período registaram, respetivamente, temperaturas 20 °C abaixo do *setpoint* definido nos circuitos do corpo e rotores, e potências superiores a 50 kW nessa TCU. Pelo facto de a potência nominal das resistências variar entre 25 e 45 kW, isto significa que havia pelo menos uma resistência permanentemente ligada e, mesmo assim, o arrefecimento era de tal ordem que impedia as correntes de recirculação de atingir a temperatura pretendida.

Relativamente às TCUs da calandra, na **Figura 4.12** apresenta-se a evolução da potência média mensal destas TCUs nas linhas #10 e #11 entre os meses de Abril de 2018 e Abril de 2019

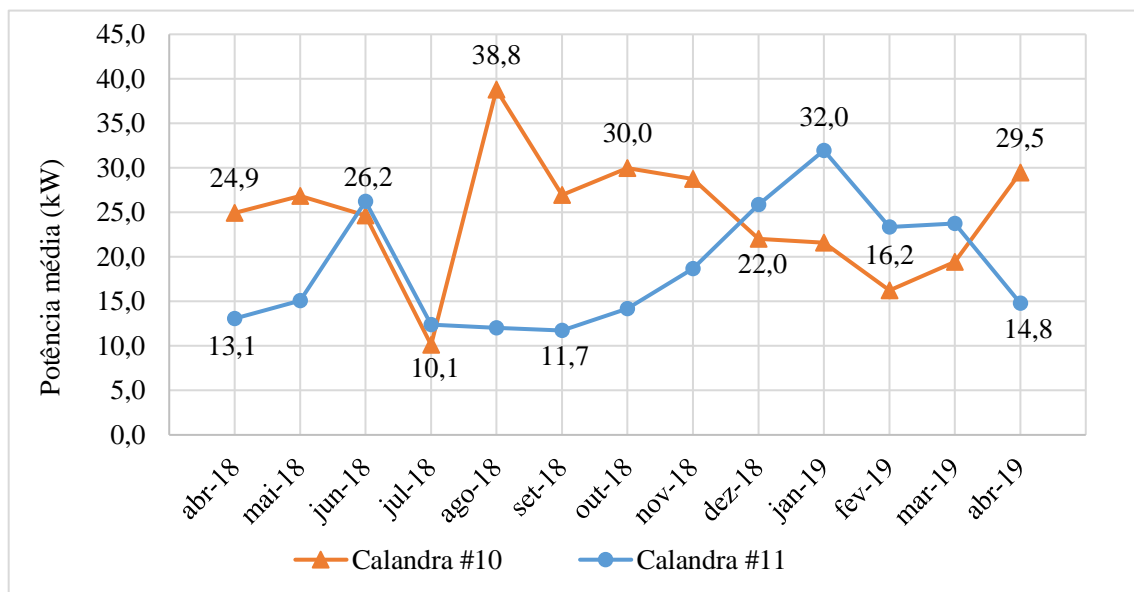


Figura 4.12 - Potência média mensal das TCUs da calandra das linhas #10 e #11 entre os meses de Abril de 2018 e Abril de 2019.

Nestes equipamentos, ao contrário dos misturadores onde a função principal é de arrefecimento, a geração de calor não é tão elevada, sendo necessário aquecer ou arrefecer cada zona dependendo da temperatura definida. Por este motivo verificaram-se grandes variações na potência média das unidades de ambas as linhas, entre 10,1 e 38,8 kW. Posto isto, não foi possível determinar se o sistema esteve a funcionar corretamente analisando apenas a potência consumida, pois uma situação de elevado consumo pode ser devido a uma baixa geração de calor no processo de calandragem ou a um elevado caudal de

arrefecimento e, por isso, ser necessário ligar as resistências em ambas as situações para aquecer a corrente de recirculação.

4.3.2 Linhas #5, #6 e #7

A **Figura 4.13** apresenta a evolução da potência das TCUs do misturador das linhas #5, #6 e #7 entre 5 de Abril e 14 de Maio de 2019, construída a partir dos dados presentes na tabela do **Anexo B.5**.

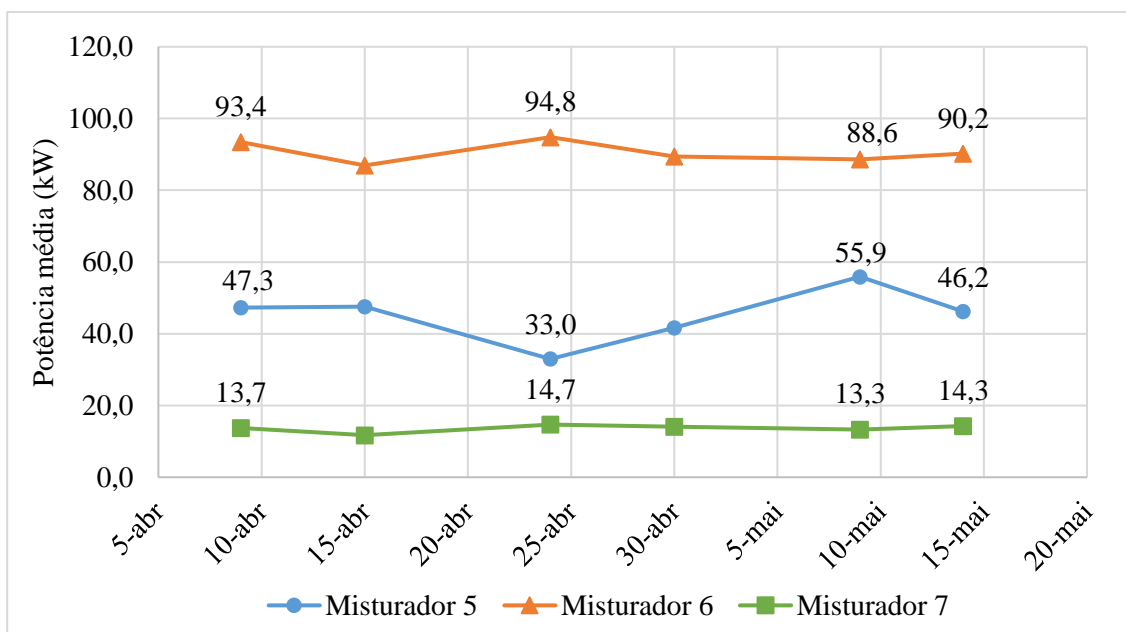


Figura 4.13 - Potência média das TCUs do misturador das linhas #5, #6 e #7 entre 5 de Abril e 14 de Maio de 2019.

De imediato é possível apurar que o maior consumidor é a TCU do misturador #6 com uma potência média de 93,1 kW, seguido do misturador #5 com 44,5 kW e, por fim, do misturador #7 com 13 kW. Estas discrepâncias podem ser justificadas por 3 motivos que se apuraram durante a análise da potência instantânea destas TCUs no contador local de energia:

- No misturador #7 verificou-se que a única resistência a funcionar era do circuito da porta, explicando assim o seu consumo reduzido;
- No misturador #6 existia uma resistência a funcionar 24 horas por dia e o controlador tinha um erro que causava a abertura das válvulas de arrefecimento imediatamente após o desligar da resistência, o que aumentava consideravelmente o seu consumo;

- No caso do misturador #5 observou-se que uma das três resistências não funcionava.

Independentemente destes problemas é expectável que, nas condições normais de funcionamento, estas TCUs consumam mais energia do que as presentes nas linhas #10 e #11, devido à diferença das válvulas de controlo existentes nos misturadores *single*: as válvulas são *On/Off*, sendo o processo de arrefecimento mais acentuado porque não há qualquer controlo do caudal de arrefecimento.

4.4 Análise das temperaturas de recirculação

Realizou-se também um levantamento das temperaturas de recirculação das TCUs, durante o processo de mistura dos compostos mais produzidos nos misturadores #10 e #11 no mês de Abril, e comparou-se com o *setpoint* de cada zona do misturador. Na **Figura 4.14** apresenta-se um gráfico com o exemplo de alguns dos desvios de temperatura, construído com base nas tabelas do **Anexo B.3**. De facto, confirmou-se a existência de desvios de temperatura significativos em ambos os misturadores, nomeadamente nos circuitos porta/martelo da câmara superior, que apresentavam desvios absolutos máximos de 30 °C. Na câmara inferior do misturador #11 verificou-se desvios máximos de 23 °C em todos os seus circuitos.

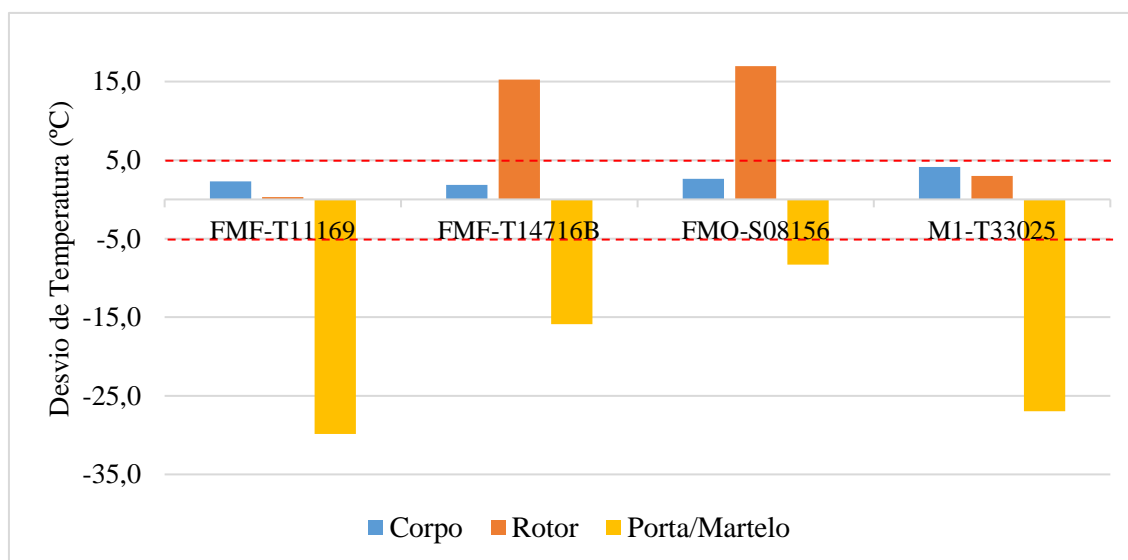


Figura 4.14 - Desvios de temperatura em alguns dos compostos mais produzidos no misturador #10 durante o mês de abril.

5. Medidas de manutenção e otimização

No presente capítulo apresentam-se as principais medidas tomadas de modo a corrigir e otimizar o funcionamento das TCUs, nomeadamente nos problemas associados às válvulas de controlo, resistências e tipo de controlador.

5.1 Válvulas de controlo e resistências

O levantamento das condições de operação atuais permitiu concluir que o sistema de controlo não só não estava otimizado em termos de consumo energético, como também não funcionava corretamente devido a equipamentos danificados - válvulas de controlo e resistências. Assim sendo, este problema foi comunicado ao departamento de Engenharia I, responsável pela manutenção dos equipamentos da fábrica, que procedeu à sua reparação. As resistências elétricas queimadas ou com o relé danificado foram reparadas. Relativamente às válvulas de controlo, verificou-se que todas as presentes nas TCUs das linhas #10 e #11 estavam danificadas e necessitavam de ser substituídas. No entanto por não haver suficientes em stock, optou-se por não substituir nenhuma e procedeu-se apenas à reparação daquelas em que era exequível reparar. Esta reparação passou por uma recalibração do seu posicionador, permitindo novamente um fecho total das válvulas até uma pressão de saída de 0 bar.

5.2 Configurações do controlador

No processo de mistura são geradas enormes quantidades de calor devido às elevadas forças de atrito e tensões de cisalhamento criadas no composto, durante a sua compressão entre o martelo e os rotores em movimento. Por isso, e pelo facto de ser necessário controlar a temperatura do composto em diferentes etapas, as correntes que percorrem as várias zonas do misturador têm como principal função o arrefecimento. Desse modo as resistências existentes nos circuitos das TCUs deveriam atuar esporadicamente sendo a

abertura e fecho das válvulas o método principal de controlo, algo que claramente não acontece como se pode ver na **Figura 4.9**.

Uma forma de corrigir este problema seria a otimização dos parâmetros PID, sintonizando o controlador para um controlo mais estável. Contudo, não se dispunha de meios para visualizar a variação da temperatura em função do tempo, por isso atuou-se na banda morta, aumentando de 1 °C para 3 °C, o que produziu o efeito que se pode ver na **Figura 5.1**.

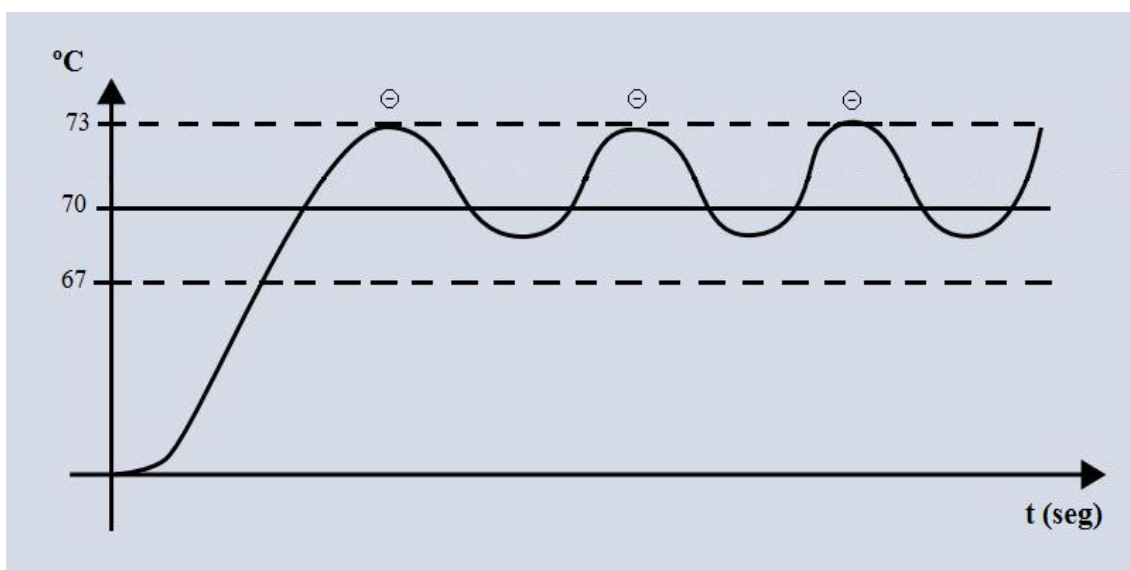


Figura 5.1 - Gráfico representativo do controlo de temperatura da corrente da TCU para uma banda morta de 3 °C. ⊖: Válvula aberta, resistência desligada.

Nesta situação, após a abertura da válvula para arrefecer a corrente de recirculação, não será necessário ativar a resistência, porque o calor recebido por esta corrente no misturador é suficiente para aumentar a sua temperatura.

6. Resultados obtidos

Um dos principais objetivos desta dissertação foi a avaliação do consumo energético na área de mistura e se possível a sua redução. Neste capítulo são apresentadas as alterações do consumo energético após a implementação das medidas de manutenção e otimização das TCUs, as melhorias no processo de mistura que resultaram destas medidas e a importância de monitorizar o consumo energético destas unidades.

É também apresentado o resultado de um trabalho de otimização iniciado pela Engenheira Anabela Guedes, relativo à temperatura de doseamento de matérias primas, e que foi concluído no âmbito deste projeto.

6.1 Alteração no consumo energético

6.1.1 Linha #10

Mediante a realização das reparações e otimizações mencionadas no **Capítulo 5**, a **Figura 6.1** apresenta a evolução da potência média diária das TCUs do misturador da linha #10. Inicialmente, entre os dias 4 e 5 de Maio, o departamento de Engenharia I procedeu à reparação das resistências elétricas, o que, devido ao problema existente nas válvulas de arrefecimento e aos parâmetros mal ajustados dos controladores, aumentou o consumo médio de 3,8 kW e 11,2 kW para 34,8 kW e 18,3 kW nas câmaras superior e inferior, respetivamente. De seguida, no dia 9 de Maio, Engenharia I recalibrou as válvulas e foram alteradas as configurações do controlador, nomeadamente na banda morta e no ganho proporcional. Estas medidas permitiram reduzir o consumo médio da câmara superior e inferior para 5,2 kW e 7,4 kW. Esta potência foi medida entre os dias 12 de Maio e 27 de Junho de 2019.

Neste momento as resistências atuam apenas nos circuitos da porta e martelo dos misturadores, porque o calor aí gerado devido à compressão do composto não é suficiente para aumentar a sua temperatura, como explicado na **secção 5.2**.

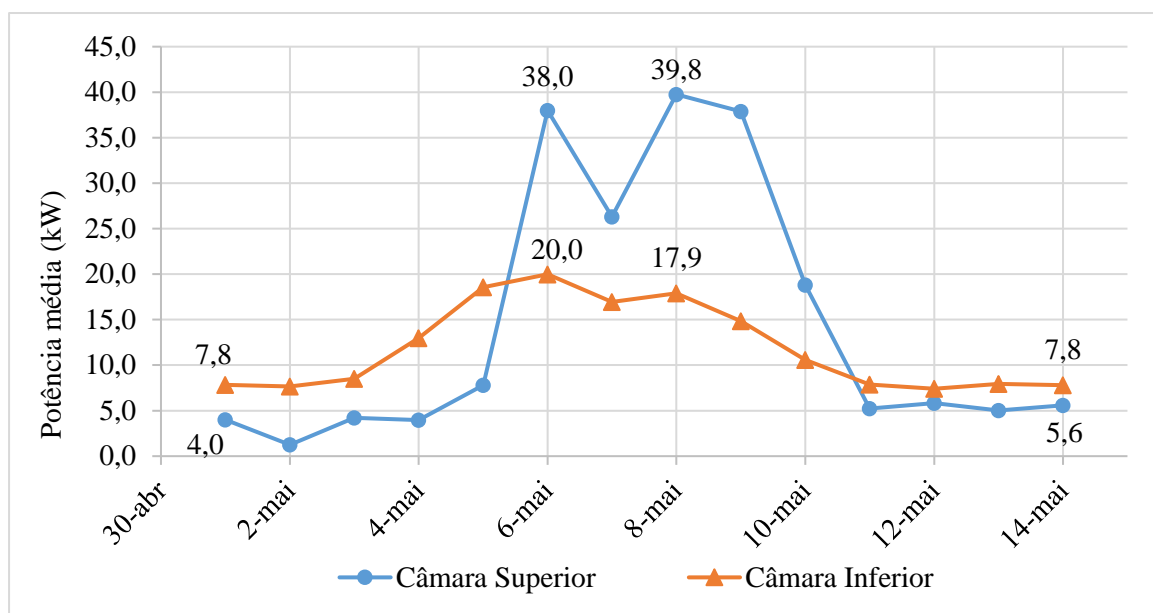


Figura 6.1 - Potência média das TCUs do misturador da linha #10 antes a após a implementação das reparações e otimizações.

Relativamente ao consumo energético, constatou-se na **secção 4.3.1** que, ao contrario da linha #11 que em Novembro de 2018 aumentou significativamente o seu consumo, a linha #10 tinha um consumo reduzido pelo facto de apenas uma das resistências estar a funcionar corretamente, caso contrário também apresentaria uma potência elevada, devido ao excessivo caudal de arrefecimento. Sendo assim a poupança energética foi obtida pela diferença entre o consumo esperado caso tivesse as resistências a funcionar, determinado entre 6 e 8 de Maio, e o consumo obtido após se atuar nas válvulas e nas configurações do controlador.

Assim, face ao custo energético anual previsto, obteve-se uma redução de 76,3%, ou seja, de 29 338 € em termos absolutos, como se pode ver na **Tabela 6.1**. Os cálculos encontram-se no **Anexo A.3**

Tabela 6.1 - Comparação entre a potência média e o custo anual previsto e após a otimização das TCUs do misturador da linha #10.

TCU	Potência média (kW)		Custo anual (€)		Poupança anual (€)
	Prevista	Após Otimização	Prevista	Após Otimização	
Câmara Superior	34,8	5,2	25 209	3 767	21 442
Câmara Inferior	18,3	7,4	13 256	5 360	7 896
				Total	29 338

Por fim, na TCU da calandra obteve-se uma potência média de 23,8 kW nos meses de Abril e Maio de 2019, mas não foi possível determinar a poupança anual pelo facto do consumo nesta unidade variar devido à natureza do processo, como explicado na **secção 4.3.1.**

6.1.2 Linha #11

As TCUs da linha #11 foram bastante afetadas pela entrada de óleo no sistema de ar comprimido. Ao contrário da linha #10, onde bastou recalibrar as válvulas de controlo, nesta linha estas ficaram tão danificadas que não abriam ou fechavam quando eram atuadas pelo controlador. Por este motivo, em vez de se recalibrar para 0 bar a posição de totalmente fechada, regulou-se manualmente a abertura da válvula para uma pressão entre 0,2 e 0,5 bar. Deste modo diminuiu-se a troca de calor entre a corrente de arrefecimento e de recirculação, mas permitindo que esta corrente de recirculação atingisse o *setpoint*. A câmara inferior do misturador não possui martelo que comprime o composto, por isso o calor gerado pelos rotores e transferido para a corrente de recirculação não sofre grande variação, permitindo que a sua temperatura se mantenha praticamente constante ao longo do tempo.

A **Figura 6.2**, apresenta a evolução da potência média diária da TCU da câmara inferior do misturador da linha #11. Como se pode observar a câmara inferior apresentava um consumo médio de 28,4 kW e, após a regulação das válvulas e alteração das configurações do controlador entre 13 e 17 de Maio, reduziu-se o consumo para 12,7 kW. Esta potência foi medida entre os dias 18 de Maio e 27 de Junho de 2019.

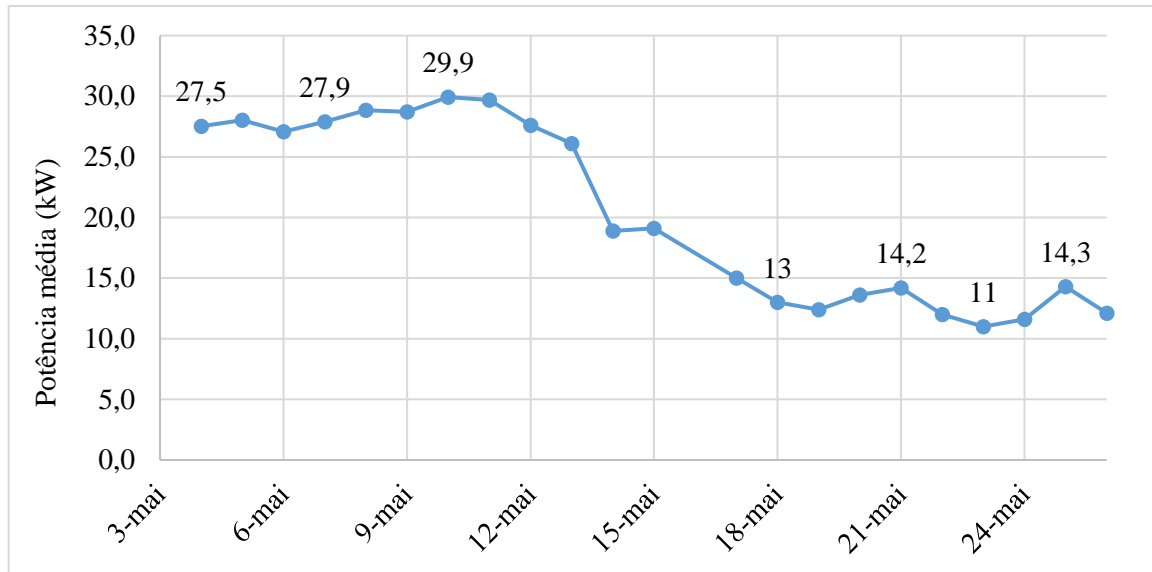


Figura 6.2 - Potência média da TCU da câmara inferior do misturador da linha #11 antes a após a implementação das reparações e otimizações.

No caso da câmara superior implementou-se as mesmas medidas da câmara inferior resultando numa redução do consumo. Contudo, estas medidas provaram ser eficazes apenas a curto prazo como se pode ver na **Figura 6.3**

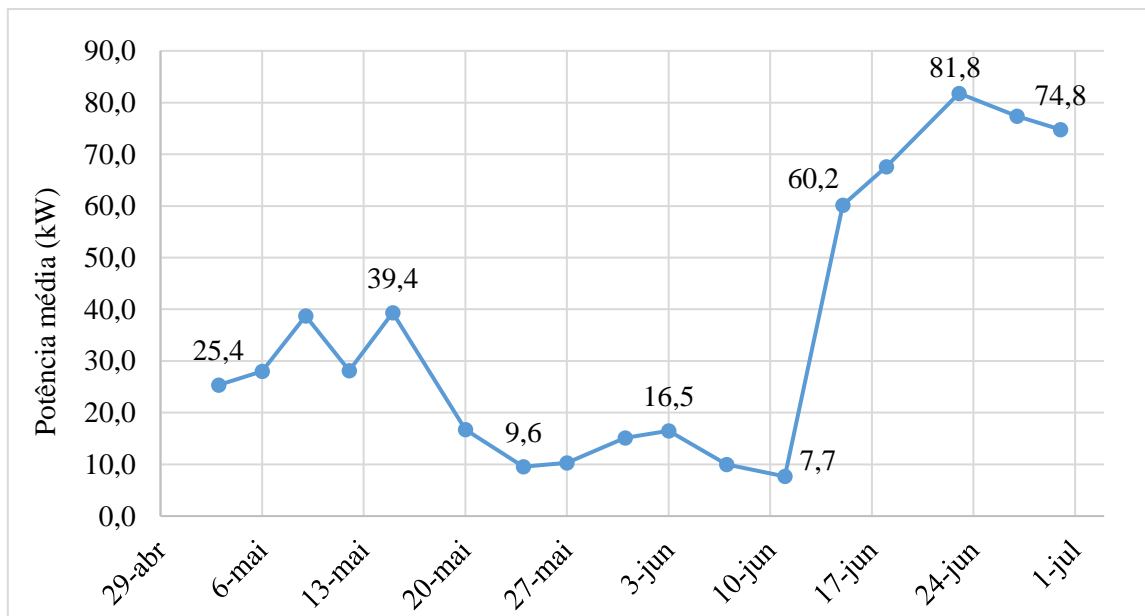


Figura 6.3 - Potência média da TCU da câmara superior do misturador da linha #11 antes a após a implementação das reparações e otimizações.

Em 19 de Maio verificou-se uma diminuição da potência média de 35,5 kW para 12,3 kW, mantendo este consumo reduzido até à data de 11 de Junho, a partir de onde se registou um aumento significativo da potência consumida para uma média de 72,3 kW até 30 de Junho desse ano. Este aumento foi devido a um problema já referido na **secção 4.3.1**: pelo facto de a câmara superior do misturador possuir martelo, que comprime o composto em determinadas fases do processo de mistura, o calor gerado pelos rotores e transferido para a corrente de recirculação é muito variável. Por este motivo, estas correntes atingiam temperaturas entre 10 a 20 °C superiores ao seu *setpoint*, pelo que, para as diminuir, o controlo das válvulas pneumáticas passou a ser feito manualmente. Contudo, este controlo era contraproducente, porque não só estas válvulas permaneciam abertas durante vários dias, como também o caudal de arrefecimento era demasiado elevado, diminuindo consideravelmente a temperatura das correntes de recirculação - até 10 a 15 °C abaixo do *setpoint*. Nesta situação as resistências permanecem ligadas por períodos que podem chegar a ser de 24 horas por dia, originando um consumo energético excessivo que, mesmo assim, devido ao elevado caudal de arrefecimento, não permite o *setpoint* ser alcançado.

A **Tabela 6.2** apresenta a poupança anual conseguida nas TCUs da linha #11, caso o controlo de caudal atuasse corretamente. Seria obtida uma redução de 60,9 % no custo energético anual, ou seja, em 28 180 € em termos absolutos.

Tabela 6.2 - Comparação entre a potência média e custo anual anterior e após a otimização das TCUs do misturador da linha #11.

TCU	Potência média (kW)		Custo anual (€)		Poupança anual (€)
	Anterior	Após Otimização	Anterior	Após Otimização	
Câmara Superior	35,5	12,3	25 717	8 910	16 806
Câmara Inferior	28,4	12,7	20 573	9 200	11 373
				Total	28 180

No entanto, na câmara superior regista-se atualmente uma potência média de 72,3 kW, em vez de 12,3 kW, devido ao funcionamento contínuo das resistências e, caso esta

situação se mantenha, ficam sujeitas a um inevitável sobreaquecimento. De acordo com o exemplo de cálculo no **Anexo A.3**, este período de incorreto funcionamento resultou num uma despesa extra de 3 622 €.

Finalmente, na TCU da calandra obteve-se uma potência média de 6,9 kW nos meses de Abril e Maio de 2019, mas não foi possível determinar a poupança anual pelo facto do consumo nesta unidade variar devido à natureza do processo, como explicado na **secção 4.3.1**.

6.1.3 Linhas #5, #6 e #7

Como referido na **secção 4.6.2** detetou-se a existência de problemas nas TCUs destas linhas, #5, #6 e #7, porém apenas se atuou na unidade de maior consumo: a TCU do misturador da linha #6. Esta tinha uma resistência ligada 24 horas por dia e um problema no controlador que causava a abertura das válvulas de arrefecimento imediatamente após o desligar da resistência. Após a atuação de Engenharia I verificou-se uma diminuição da potência média da TCU a partir de 5 Junho, como se pode observar na **Figura 6.4** que apresenta a evolução da potência média da TCU do misturador #6 neste período.

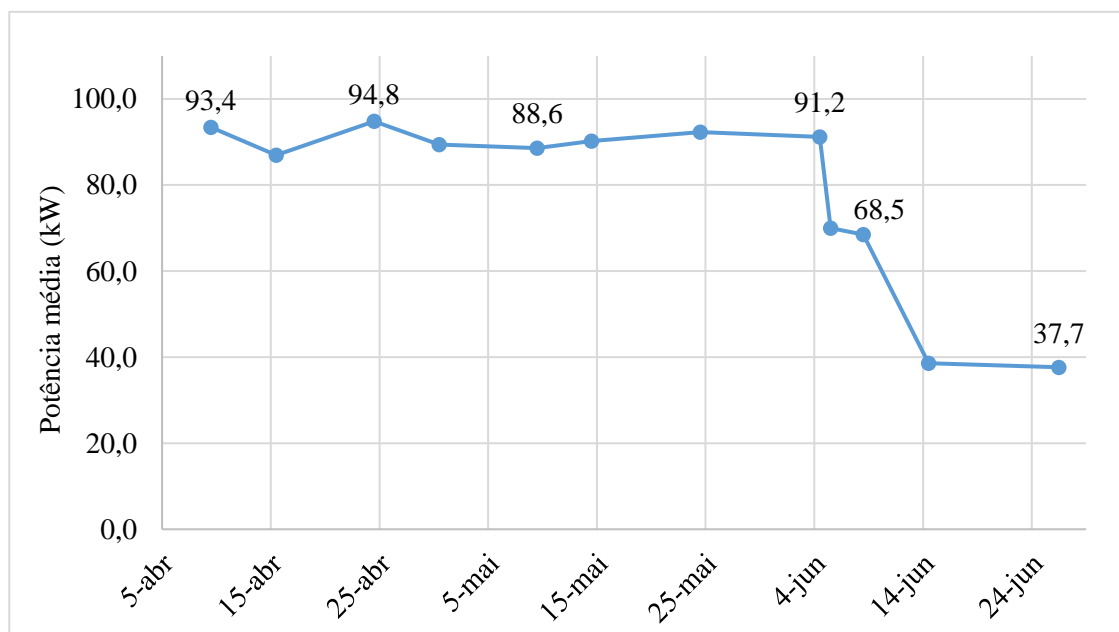


Figura 6.4 - Potência média da TCU da câmara do misturador da linha #6 entre 9 de Abril e 26 de Junho de 2019.

Antes da reparação a unidade tinha uma potência média de 91,6 kW e, após a sua correção, apresenta atualmente uma potência média de 38 kW. De acordo com o exemplo de cálculo no **Anexo A.3**, isto significa que o período de incorreto funcionamento resultou numa despesa extra de 6 489 €.

A **Tabela 6.3** apresenta a potência média e custo anual das TCUs das linhas #5, #6 e #7, considerando que as condições atuais se mantêm idênticas ao longo do ano. Na linha #7 registou-se uma potência média reduzida pelo facto de apenas uma das resistências de aquecimento funcionar.

Tabela 6.3 - Potência média e custo anual atual das TCUs dos misturador das linhas #5, #6 e #7.

TCU do misturador	Potência média (kW)	Custo anual (€)
Linha #5	44,5	32 237
Linha #6	38	27 528
Linha #7	13	9 417

6.2 Temperatura de doseamento de matérias primas

No processo de mistura são adicionadas diferentes matérias primas com viscosidades elevadas, nomeadamente óleos, resinas e borrachas líquidas, que têm de ser aquecidas até uma determinada temperatura para permitir o seu correto escoamento pelas tubagens de doseamento. No sentido de otimizar este processo de doseamento a Engenheira Anabela Guedes, Doutorada em Engenharia Química pela Universidade de Aveiro, estudou o comportamento da viscosidade destas matérias primas em função da temperatura e determinou as temperaturas mínimas que garantiam um escoamento fluido. Posteriormente, a empresa alterou as temperaturas de doseamento na linha #10 mas, devido à falta de dados acerca dos compostos, não foi possível quantificar as poupanças obtidas. No decorrer desta dissertação foi possível recolher os dados em falta e determinou-se uma poupança anual de cerca de 1 792€ - **Anexo C**.

6.3 Melhorias no processo de mistura

A realização de medidas de manutenção e otimização nas Unidades de Controlo de Temperatura permitiu não só uma redução do consumo energético da fábrica, como também assegurou que durante o processo de mistura as correntes de recirculação atingem a temperatura definida, não ocorrendo aquecimento nem arrefecimento indesejado, melhorando as propriedades do composto. Identificaram-se também melhorias na fase de silanização, no qual as baixas temperaturas dos rotores e corpo do misturador impediam que determinados compostos atingissem a temperatura ideal dessa etapa. Ao garantir a correta temperatura das correntes este problema foi corrigido. Um benefício adicional foi a redução dos tempos de pausa entre cada *batch*: ao garantir que a porta do misturador atingisse a temperatura requerida, diminuiu o número de vezes que certos compostos colavam à porta e a mistura tinha de ser suspensa para resolver esse problema. Estas melhorias foram obtidas apenas na linha #10, sendo necessário a correção dos problemas na linha #11 para surtirem efeito nessa mesma linha.

6.4 Importância da monitorização do consumo energético

A monitorização do consumo energético das TCUs, através do *MessDas*, é uma ferramenta de fundamental importância devido a vários motivos, tais como:

- Possibilita a quantificação do consumo e do custo elétrico anual destes equipamentos;
- Facilita a identificação de avarias ou de funcionamentos “defeituosos”, aumentando o tempo de resposta a estes problemas de modo a evitar situações de consumo excessivo - como no caso das linhas #6 e #11 - ou que comprometam o processo de mistura e, por sua vez, a qualidade do produto final - como acontece no caso das correntes de recirculação que atingem valores de temperatura 10 a 15 °C abaixo do *setpoint*;
- Permite determinar a redução do consumo energético devido a uma medida de otimização, o seu período de retorno caso haja investimento, e a possibilidade de implementar essa mesma medida nas restantes TCUs, podendo prever a poupança energética daí resultante.

7. Conclusões

Com a realização desta dissertação foi possível cumprir o principal objetivo de aumento da eficiência energética no setor de Mistura, nomeadamente das Unidades de Controlo de Temperatura (TCUs) das linhas de mistura #10 e #11. Este sistema permite controlar a temperatura dos misturadores durante o processo de mistura, garantindo o correto desempenho das diferentes fases, e dos equipamentos de extrusão e de moinhos, de modo a controlar a aderência da borracha aos rolos durante o processo de calandragem.

Inicialmente efetuou-se um levantamento energético destas unidades e das condições operatórias atuais relativamente aos seguintes parâmetros: caudal de recirculação das bombas centrífugas, análise de perdas térmicas nas tubagens e permutadores, e funcionamento das válvulas de controlo e resistências de aquecimento. A recolha de dados de consumo foi realizada através da ferramenta *MessDas*, que é um sistema de gestão de energia que permite acompanhar de forma pormenorizada os consumos energéticos dos diversos setores e respetivos equipamentos. De seguida, conforme as condições verificadas, foram implementadas medidas de manutenção e otimização do funcionamento das TCUs, atuando especificamente na válvulas de controlo, resistências e configurações do controlador PID.

Em termos de consumo energético, alcançou-se uma **poupança total anual de 40 711 €**, resultado de uma redução de **29 338 €** nas unidades da linha #10, e de **11 373 €** na unidade da câmara inferior da linha #11. Concluiu-se também que, na situação de funcionamento otimizado, não existe alteração do consumo energético pela redução das temperaturas das correntes de recirculação do corpo e rotores dos misturadores #10 e #11, isto porque o calor aí gerado pela compressão do composto ser suficiente para manter as temperaturas constantes.

A nível da mistura, na linha #10, o controlo do processo foi melhorado, pois ficou assegurado que as correntes atingem a temperatura especificada e não ocorre aquecimento nem arrefecimento indesejado.

Foi também concluído o trabalho de otimização das temperaturas de doseamento de matérias primas pela Engenheira Anabela Guedes, obtendo-se uma **poupança anual de 1 792 €**.

Finalmente é importante realçar que este trabalho e os resultados obtidos não seriam possíveis caso não existisse o sistema de recolha de dados de consumo *MessDas*. Este permitiu a quantificação do consumo elétrico e do custo anual destas unidades e, posteriormente, da poupança energética obtida pelas otimizações. A monitorização do consumo energético das TCUs através desta ferramenta permite também identificar e evitar situações de consumo excessivo de energia, como aconteceu no caso da linha #6, que apresentou uma despesa extra evitável de **6 489 €** num período de 2 meses.

O capítulo seguinte apresenta uma série de propostas com o objetivo de continuar a melhoria do setor de mistura, tanto a nível energético como a nível do processo de mistura.

8. Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar dos objetivos terem sido cumpridos, restam ainda oportunidades de otimização nas Unidades de Controlo de Temperatura que permitem uma maior redução do consumo energético da fábrica e uma melhoria do processo de mistura. Sugere-se então no futuro:

- A necessidade de substituir as válvulas de controlo das linhas #10 e #11 de modo a evitar novas situações de consumo excessivo, em especial o caso da unidade da câmara superior do misturador da linha #11 que permitiria poupar anualmente **16 806 €**;
- Implementar a ferramenta *MessDas* nas restantes TCUs da fábrica, algo considerado de fundamental importância como demonstrado na **secção 6.4**;
- Pelo facto de, após as otimizações, as resistências apenas serem necessárias para manter constante a temperatura dos circuitos da porta e martelo, verificar o efeito da diminuição desta temperatura no processo de mistura e no consumo de energia. Assumindo que na linha #11 se consegue remover a necessidade de aquecimento, estima-se uma redução de 7 kW, correspondendo a uma poupança anual de **5 000 €** em cada unidade dos misturadores;
- Analisar o efeito dos *setpoints* de temperatura atuais das TCUs no processo de mistura;
- Averiguar a possibilidade de, nas linhas #0 a #7 onde não existe qualquer controlo do caudal de arrefecimento, alterar as configurações do controlador PID de modo a reduzir o consumo energético destas unidades. De facto, caso se consiga obter nas linhas #5 e #6 condições semelhantes às das linhas #10, assumindo uma potencial redução de 25 kW no consumo de cada unidade - de 40 kW para 15 kW - será possível poupar aproximadamente **36 000 €** por ano nas duas TCUs. Caso contrário, estudar a viabilidade de alterar nessas linhas as válvulas *On/Off* por válvulas com posicionador e, nesse caso analisar o respetivo período de retorno de investimento. Assumindo que cada unidade necessita de 3 válvulas com posicionador e o preço de cada uma é de **3 000 €**, no período apenas **6 meses** o investimento seria recuperado.

Referências Bibliográficas

- [1] Leite, J. (2012). Mabor - Manufactura Nacional de Borracha. Restos de Coleção. Disponível em: <http://restosdecoleccion.blogspot.com/2012/01/mabor-manufactura-nacional-de-borracha.html> [acedido em 10 de abril de 2019].
- [2] Continental Aktiengesellschaft (2018). Continental - Networking 2018 Annual Report. Hanover. Disponível em: <http://report.conti-online.com/2018/en/service/docs/annual-report-2018-data.pdf> [acedido em 11 de abril de 2019].
- [3] Neves, R. (2018). Continental Mabor com lucros de 212 milhões e vendas de 878 milhões em 2017. Jornal de Negócios. Disponível em: <https://www.jornalde negocios.pt/empresas/industria/detalhe/continental-mabor-com-lucros-de-212-milhoes-e-vendas-de-878-milhoes-em-2017> [acedido em 10 de abril de 2019].
- [4] Camarinha, S. (2014). Lousado, terra da melhor fábrica de pneus do mundo Continental. Jornal de Notícias. Disponível em: <https://www.jn.pt/microsites/fazemos-bem/noticias/interior/lousado-terra-da-melhor-fabrica-de-pneus-do-mundo-continental-4018962.html> [acedido em 10 de abril de 2019].
- [5] Continental-pneus.pt. (2019). Fatos & Números. Disponível em: <https://www.continental-pneus.pt/industriais/empresa/sobreacontinental/corporate> [acedido em 10 de abril de 2019].
- [6] ContiAcademy (2018). Formação - Nível Básico. Continental AG.
- [7] Vinhas, H. (2016). Otimização Energética de Equipamentos Produtivos. Mestre em Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [8] Feierabend, R. (2019). Basics of Mixing. Continental AG
- [9] Azevedo, T. (2016). Revisão dos tempos-padrão no setor de construção de pneus. Mestre em Engenharia e Gestão Industrial. Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão.
- [10] Gomes, M. (2018). Introdução à Vulcanização. Rubberpedia.com. Disponível em: <http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao.php> [acedido em 10 de abril de 2019].
- [11] Kern, D. (1983). Process heat transfer. Tokyo: McGraw-Hill International.
- [12] Ribeiro, A. and Neto, M. (2014). Transferência de Calor.

- [13] Çengel, Y. and Ghajar, A. (2012). Transferência de calor e massa. 4th ed. McGraw Hill.
- [14] Gonçalves, A. (2016). Bombas Hidráulicas. Rio Grande. Disponível em: <http://docente.ifrn.edu.br/andouglassilva/disciplinas/mecanica-dos-fluidos/aula-8-bombas> [acedido em 30 de maio de 2019].
- [15] GAMBICA Association Ltd (2014). Variable Speed Driven Pumps - Best Practice Guide. Londres. Disponível em: http://www.brookcrompton.com/upload/files/literature/GAMBICA_VSD_Pumps_Best_Practice_Guide.pdf [acedido em 3 de julho de 2019].
- [16] Leite, P., Ferreira, F., Valente, L. and Vivas, E. (2012). Os variadores de velocidade como instrumentos de otimização energética em estações elevatórias de águas residuais. Vila Nova de Gaia. Disponível em: https://noraqua.pt/publicacoes/Os_variadores_de_velocidade_optim_energ.pdf [acedido em 3 de julho de 2019].
- [17] Caetano, M. (2019). Finalidade da Operação de Mistura. Ciência e Tecnologia da Borracha. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/processos/mistura/finalidade-da-operacao-de-mistura/> [acedido em 16 de abril de 2019].
- [18] Heck, V. (2019). Processamento de Polímeros. Polímeros. Disponível em: http://www.ufrgs.br/lapol/processamento/l_33.html [acedido em 16 de abril de 2019].
- [19] John Wiley and Sons (2006). Representação esquemática de uma mistura distributiva e dispersiva. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-distributive-and-dispersive-mixing-Adapted-from-108_fig8_312306154 [acedido em 16 de abril de 2019].
- [20] Moriba, T. (2012). Mecanismo de mistura. Disponível em: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e494/e494038.pdf> [acedido em 16 de abril de 2019].
- [21] DIP Materiais (2018). Noções básicas - Materiais que constituem os pneus. Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A
- [22] Wood, P. (2005). Mixing of Vulcanisable Rubbers and Thermoplastic Elastomers. Shrewsbury: ISmithers Rapra Pub.

- [23] McQuillan, F., Culham, J. and Yovanovich, M. (1984). Properties of dry air at one atmosphere. Waterloo. Disponível em: http://www.mhtlab.uwaterloo.ca/pdf_reports/mhtl_G01.pdf [acedido em 16 de abril de 2019].

Anexos

Anexo A - Exemplos de cálculo

A.1 Curvas da bomba

Neste anexo apresenta-se as curvas da bomba ETABLOC GN 032-125 e a determinação e validação das curvas específicas dessa bomba para diferentes frequências de rotação

Curva da bomba ETABLOC GN 032-125

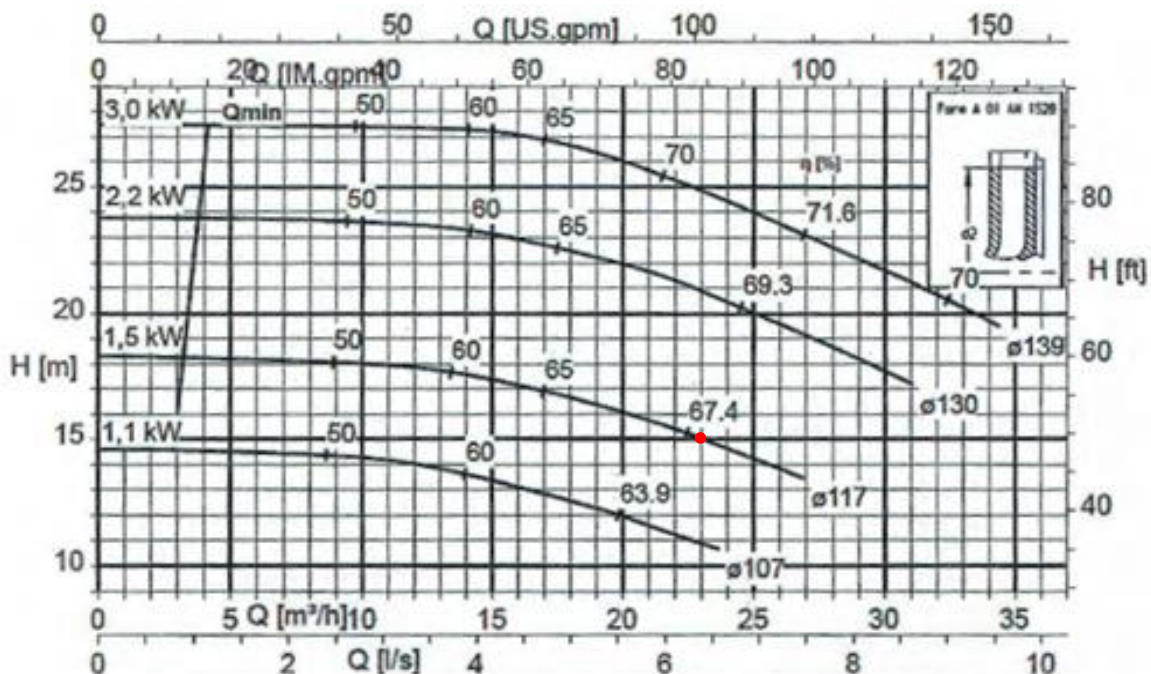


Figura A.1 - Curvas específicas da bomba ETABLOC GN 032-125 para uma frequência de rotação de 50 Hz.

Determinação das curvas específicas da bomba para diferentes frequências de rotação

Através da **Figura A.1**, assumindo uma frequência constante e através das leis de afinidade, converteu-se a curva de diâmetro impulsor 117 mm em 120 mm. Tomando o ponto a vermelho assinalado na figura como exemplo de cálculo:

$$Q_1 = 23 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_1 = 15 \text{ m}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \Leftrightarrow Q_2 = \frac{D_2}{D_1} \cdot Q_1 \Leftrightarrow Q_2 = \frac{120}{117} * 23 \Leftrightarrow Q_2 = 23,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \Leftrightarrow H_2 = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \cdot H_1 \Leftrightarrow H_2 = \left(\frac{120}{117}\right)^2 * 15 \Leftrightarrow H_2 = 15,8 \text{ m}$$

Obtida a curva específica da bomba para 120 mm e 50 Hz obteve-se as curvas para as diferentes frequências de rotação, assumindo um diâmetro impulsor constante - **Figura A.2**. Como exemplo de cálculo, para obter a curva relativa à frequência de 25 Hz aplicou-se as leis de afinidade novamente:

$$Q_1 = 23,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_1 = 15,8 \text{ m}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \Leftrightarrow Q_2 = \frac{N_2}{N_1} Q_1 \Leftrightarrow Q_2 = \frac{25}{50} * 23,6 \Leftrightarrow Q_2 = 11,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \Leftrightarrow H_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 H_1 \Leftrightarrow H_2 = \left(\frac{25}{50}\right)^2 * 15,8 \Leftrightarrow H_2 = 4,0 \text{ m}$$

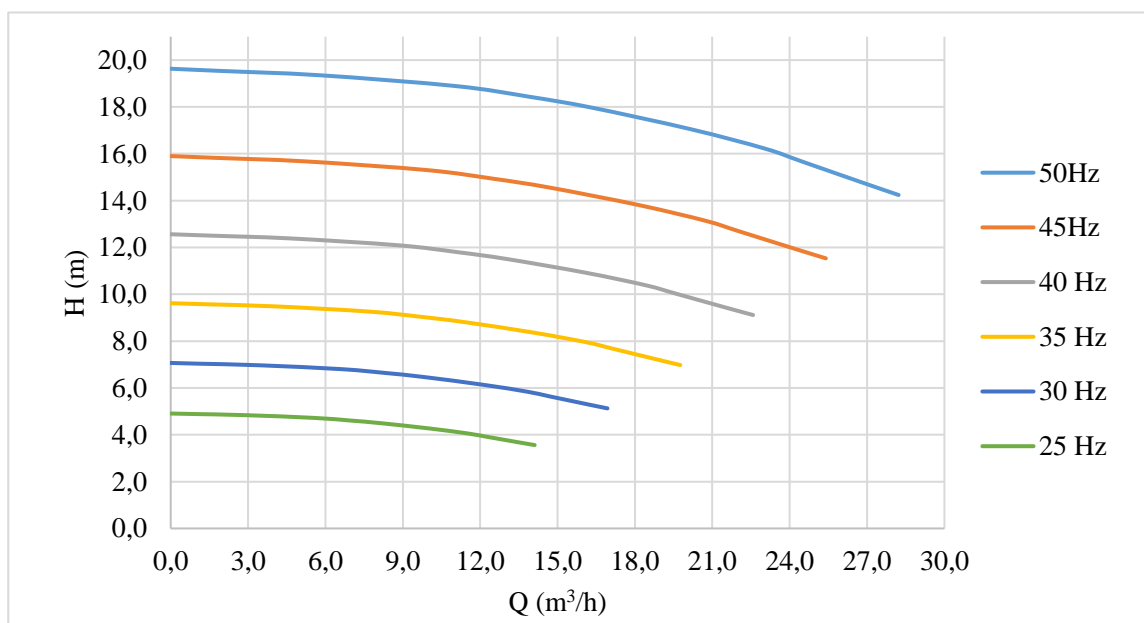


Figura A.2 - Curvas da bomba ETABLOC GN 032-125-Ø120 mm para diferentes frequências de rotação.

Validação das Leis de Afinidade

Para efeitos de validação foram efetuadas medições da diferença de pressão na bomba em função de diferentes frequências de rotação num determinado circuito e determinou-se a curva experimental do sistema.

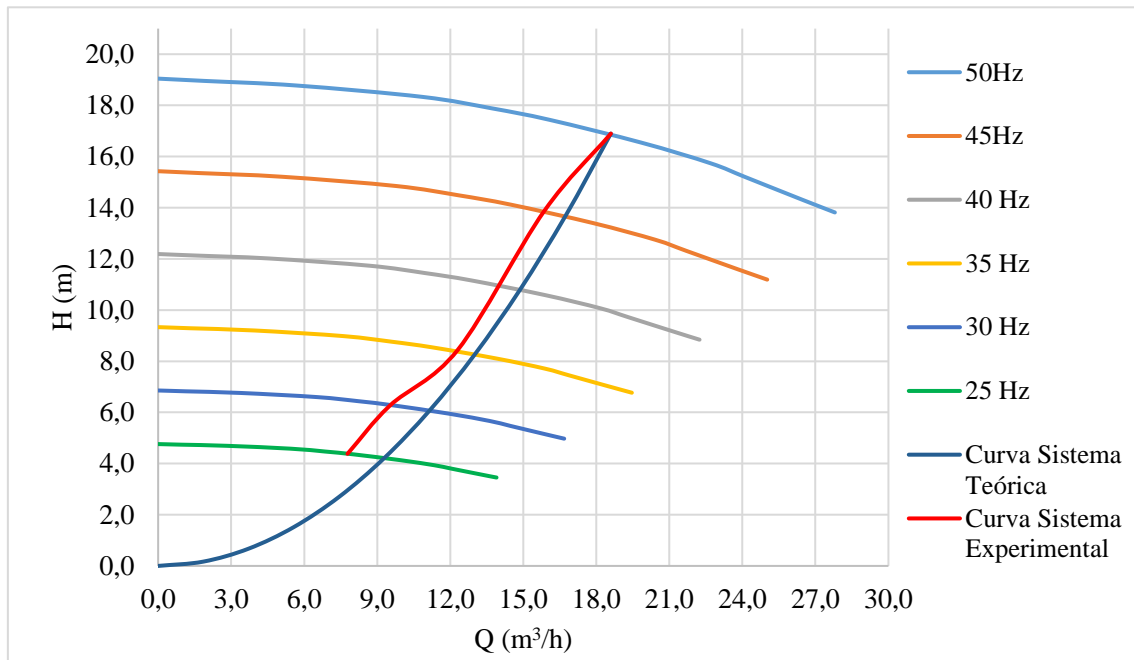


Figura A.3 - Curvas da bomba ETABLOC GN 032-125-ø118 mm para diferentes frequências de rotação e respectivas curvas teórica e experimental do sistema, num determinado circuito.

A.2 Perda de calor nas tubagens

Para determinar a temperatura de entrada da água no misturador foi necessário avaliar as perdas de calor existentes. Em cada circuito, as tubagens têm as seguintes características:

- Material: Aço inoxidável;
- Diâmetro externo: entre 60,3 e 73 mm;
- Espessura: Schedule 40 (3,9 mm);
- Comprimento: entre 25 e 40 m;
- Emissividade: 0,3;
- Sem isolamento.

O coeficiente de convecção natural foi determinado através de correlações empíricas para convecção natural específicas para o ar. Como exemplo de cálculo assumiu-se as condições de perda máxima apresentadas na **Tabela 4.1** e as propriedades do ar foram determinadas através de correlações, sendo avaliadas à temperatura média entre o ar e o a parede das tubagens. A dimensão característica a usar na expressão de $Gr Pr$ foi o comprimento dos tubos, uma vez que se pretende avaliar o coeficiente de convecção em tubos verticais [23].

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{70 + 25}{2} + 273,15\right)} = 3,1 * 10^{-3}$$

$$Gr Pr = \frac{40^3 * 1,10^2 * 9,81 * 3,1 * 10^{-3} * (70 - 25)}{(1,95 * 10^{-5})^2} * \frac{1007.3 * 1,95 * 10^{-5}}{0,0276}$$

$$= 2,0 * 10^{14}$$

Assumiu-se que a parede externa da tubagem se encontra à mesma temperatura da água que circula no seu interior. Mediante o valor de $Gr Pr$ e de acordo com a **Tabela A.1** utilizou-se a correlação para tubos verticais:

$$h = 1,24 (\Delta T)^{\frac{1}{3}} = 1,24 * (70 - 25)^{\frac{1}{3}} = 4,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

O calor transferido por convecção e radiação no comprimento total da tubagem foi calculado pela equação

$$q_{conv+rad} = h A_{ext} (T_p - T_{ar}) + A_{ext} \sigma \varepsilon (T_p^4 - T_{viz}^4) \Leftrightarrow$$

$$A_{ext} = \pi D L = \pi * 73 * 10^{-3} * 40 = 9,2 m^2$$

Sendo $T_{viz} = T_{ar}$:

$$\Leftrightarrow q_{conv+rad} = 4,4 * 9,2 * (70 - 25) + 9,2 * 5,67 * 10^{-8} * 0,3 * [(70 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4] = 2,8 \text{ kW}$$

Finalmente obteve-se a temperatura de entrada no misturador. As propriedades da água foram determinadas de acordo com correlações e avaliadas à temperatura de 70 °C.

$$\begin{aligned} q_{conv+rad} &= \dot{m} \, c_p (T_{saída \text{ permutador}} - T_{entrada \text{ misturador}}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 2,8 &= 9 * \frac{978,3}{3600} * 4,19 * (70 - T_{entrada \text{ misturador}}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T_{entrada \text{ misturador}} &= 69,7 \text{ °C} \end{aligned}$$

Tabela 0.1 - Correlações empíricas para o cálculo do coeficiente de transferência de calor do ar a 1 atm convecção natural [12].

Geometria	$Gr - Pr$	Coefficiente de transferência de calor ($W/(m^2 \cdot K)$)
Placas e tubos verticais	$10^4 - 10^9$	$h = 1,37 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$
	$> 10^9$	$h = 1,24 (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$
Placas e tubos horizontais	$10^3 - 10^9$	$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{\frac{1}{4}}$
	$> 10^9$	$h = 1,24 (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$
Placas horizontais: com a superfície superior aquecida ou a superfície inferior arrefecida	$10^5 - 2 \times 10^7$	$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$
	$2 \times 10^7 - 3 \times 10^{10}$	$h = 1,52 (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$
Placas horizontais: com a superfície superior arrefecida ou a superfície inferior aquecida	$3 \times 10^4 - 3 \times 10^{10}$	$h = 0,59 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$

A.3 Poupança Anual

O cálculo da poupança anual é feito através da diferença entre o custo anterior às medidas de manutenção e otimização e o custo obtido por implementação das mesmas. Este valor é determinado em função da potência média diária, do preço por MWh - 88€ - e dos dias de operação. Durante o ano de 2018, entre férias, feriados e períodos de paragem por motivo de manutenção, as TCUs não operaram em 22 dias na linha #10, por isso assumiu-se 343 dias de trabalho.

Para o exemplo de cálculo apresentado utilizou-se a câmara superior desta linha

Câmara Superior

$$\text{Custo anual anterior} = 34,8 * 24 * 343 * 88 \div 1000 = 25209 \text{ €}$$

$$\text{Custo anual após otimização} = 5,2 * 24 * 343 * 88 \div 1000 = 3767 \text{ €}$$

$$\text{Poupança anual} = 25209 - 3767 = 21442 \text{ €}$$

Anexo B - Características de funcionamento das TCUs

Neste anexo apresenta-se toda a informação relativa ao consumo dos equipamentos principais das linhas #10 e #11, ao consumo das TCUs e à análise do seu correto funcionamento.

B.1 Consumo dos principais equipamentos das linhas #10 e #11

Estes dados de consumo foram obtidos pelo programa *MMS*.

Tabela B.1 - Percentagem do consumo dos principais equipamentos da linha #10.

Equipamento	Consumo (MWh)				
	Jan-19	Fev-19	Mar-19	Média Mensal	%
Motor Superior	277,1	247,2	299,3	274,6	53,3
Motor Inferior	83,3	80,6	83,0	82,3	16,0
TCUs	31,7	21,1	26,3	26,4	5,1
Siemens Control	50,1	34,4	38,9	41,1	8,0
Quadro Auxiliares	58,1	36,0	40,8	45,0	8,7
Calandra + Extrusora	56,6	38,6	41,9	45,7	8,9
Total	557,0	457,8	530,3	515,0	

Tabela B.2 - Percentagem do consumo dos principais equipamentos da linha #11.

Equipamento	Consumo (MWh)				
	Jan-19	Fev-19	Mar-19	Média mensal	%
Motor Superior	517,9	492,1	552,7	520,9	58,4
Motor Inferior	154,8	145,6	154,4	151,6	17
TCUs	78,1	53,3	65,3	65,5	7,3
Siemens Control	56,6	51,7	58,9	55,7	6,2
Quadro Auxiliares	23,6	22,2	25,5	23,8	2,7
Calandra + Extrusora	74,0	70,7	78,8	74,5	8,3
Total	905,0	835,7	935,5	892,1	

B.2 Análise dos permutadores

Foi possível analisar todas as TCUs das linhas #10 e #11, à exceção da câmara inferior do misturador #10 pelo facto de o equipamento de medição de temperatura e caudal da corrente fria se encontrar avariado.

Tabela B.3 – Eficiência da transferência de calor na câmara inferior do misturador #11.

Ensaio	Corrente Fria			Corrente Quente				Potência Cedida (kW)	Potência Recebida (kW)	Eficiência (%)
	T _{fe}	T _{fs}	Caudal (m ³ /h)	ΔT_{Corpo}	ΔT_{Rotor}	ΔT_{Porta}	Caudal (m ³ /h)			
1	21,2	27,2	13,4	1,1	1,1	2	21	102,4	93,4	91,2%
	21,2	26,9	12,9	0,9	1	2		95,1	86,0	90,4%
	21,3	26,5	12,9	0,9	1	1,8		90,2	78,2	86,7%
2	21,8	26,6	10,4	0,4	0,5	1,8		65,8	58,1	88,2%
	21,9	26,8	9,7	0,5	0,6	1,6		65,8	55,2	83,9%
	21,7	26,1	9,7	0,3	0,5	1,4		53,6	49,8	92,8%
3	21	26,1	15,4	1	1,1	2,3		107,3	91,6	85,4%
	21	25,3	14,9	0,7	1	2		90,2	74,4	82,5%
	20,8	24,9	15,0	0,7	0,8	1,8		80,5	71,6	88,9%

Tabela B.4 - Eficiência da transferência de calor na câmara superior do misturador #11.

Ensaio	Corrente Fria			Corrente Quente				Potência Cedida (kW)	Potência Recebida (kW)	Eficiência (%)
	T _{fe}	T _{fs}	Caudal (m ³ /h)	ΔT_{Corpo}	ΔT_{Rotor}	$\Delta T_{\text{Porta/Martelo}}$	Caudal (m ³ /h)			
1	21,1	33,9	16,0	3,5	4	2,7	21	248,7	238,4	95,9%
	21,3	33,2	17,1	3,4	4	2,9		251,1	236,6	94,2%
	21,2	33	16,8	3,3	4	2,7		243,8	230,0	94,3%
2	21,8	26,6	10,4	1,9	3,1	1,6		160,9	155,0	96,3%
	21,9	26,8	9,7	1,8	3,6	1,5		173,1	170,5	98,5%
	21,7	26,1	9,7	1,5	2,5	1,4		131,7	119,9	91,0%
3	21	26,1	15,4	2,6	3,3	2,2		197,5	193,0	97,7%
	21	25,3	14,9	2	2,4	1,6		146,3	126,5	86,5%
	20,8	24,9	15	2,5	1,2	2,5		151,2	139,3	92,2%

Tabela B.5 - Eficiência da transferência de calor na calandra da linha #11.

Ensaio	Corrente Fria			Corrente Quente				Caudal (m ³ /h)	Potência Cedida (kW)	Potência Recebida (kW)	Eficiência (%)
	T _{fe}	T _{fs}	Caudal (m ³ /h)	$\Delta T_{\text{Sem-fim}}$	ΔT_{Corpo}	$\Delta T_{\text{Rolo-Sup}}$	$\Delta T_{\text{Rolo-Inf}}$				
1	21,6	32,8	6	1,4	0,6	1,9	1,9	21	141,42	78,03	55,2%
	21,7	32,7	6,1	1,4	0,6	1,8	1,9		138,99	77,78	56,0%
	21,8	33	6,1	1,5	0,6	1,8	2		143,86	79,07	55,0%
2	22	28	6,0	0,8	0,3	1,3	0,6		73,15	42,01	57,4%
	21,9	28,2	5,7	0,8	0,2	1,2	0,8		73,15	41,62	56,9%
	21,7	28	5,9	1	0,3	1,2	1		85,34	42,79	50,1%

Tabela B.6 - Eficiência da transferência de calor na câmara superior do misturador #10.

Ensaio	Corrente Fria			Corrente Quente			Caudal (m ³ /h)	Potência Cedida (kW)	Potência Recebida (kW)	Eficiência (%)
	T _{fe}	T _{fs}	Caudal (m ³ /h)	ΔT_{Corpo}	ΔT_{rotor}	$\Delta T_{\text{Porta/Martelo}}$				
1	22,5	37,6	2,48	1,2	0,8	0,2	16,5	57,48	43,48	75,7%
	22,5	36,8	2,71	1,3	0,8	0,2		59,39	45,00	75,8%
	22,3	36,3	2,64	1,3	0,7	0,2		57,48	42,91	74,7%
2	21,1	38,2	2,53	1,2	0,9	0,3		65,14	50,23	77,1%
	21,1	38,7	2,14	1	0,8	0,4		61,31	43,73	71,3%
	21	40,5	2,67	1,2	0,9	1,5		90,04	60,45	67,1%

Tabela B.7 - Eficiência da transferência de calor na calandra da linha #10.

Ensaio	Corrente Fria			Corrente Quente				Caudal (m ³ /h)	Potência Cedida (kW)	Potência Recebida (kW)	Eficiência (%)
	T _{fe}	T _{fs}	Caudal (m ³ /h)	$\Delta T_{\text{Sem-fim}}$	ΔT_{Corpo}	$\Delta T_{\text{Rolo-Sup}}$	$\Delta T_{\text{Rolo-Inf}}$				
1	22,5	37,6	2,5	1,2	0,8	0,2	0,8	16,5	57,48	43,48	75,7%
	22,5	36,8	2,7	1,3	0,8	0,2	0,8		59,39	45,00	75,8%
	22,3	36,3	2,6	1,3	0,7	0,2	0,8		57,48	42,91	74,7%
2	21,1	38,2	2,5	1,2	0,9	0,3	1		65,14	50,23	77,1%
	21,1	38,7	2,1	1	0,8	0,4	1		61,31	43,73	71,3%
	21	40,5	2,7	1,2	0,9	1,5	1,1		90,04	60,45	67,1%

B.3 Análise das temperaturas de recirculação

Os dados relativos aos desvios de temperatura de recirculação face ao *setpoint* definido foram retirados do programa *MMS*.

Tabela B.8 - Desvios de temperatura nas TCUs no processo de mistura dos compostos mais produzidos nos misturador #10.

Composto	Data	Desvio (°C)					
		Câmara Superior			Câmara Inferior		
		Corpo	Rotor	Porta/ Martelo	Corpo	Rotor	Porta
FMF-T11169	28-mar	-3,8	-3,9	-5	0,5	0,2	-0,2
	16-abr	2,1	0,5	-29	-0,3	0,5	0,4
	18-abr	2,3	0,3	-30	0,4	0,4	0,1
FMF-T14716B	09-abr	-1,5	-10	-22	-2,6	-1,2	-0,1
	14-abr	1,8	15	-16	1,6	4,4	0,1
	19-abr	1,4	0,2	-29	0,7	0,2	0,3
FMO-S08156	06-abr	0,0	-6	-15	-0,2	3,2	0,2
	11-abr	2,6	17	-8	0,8	3,7	0,1
	17-abr	2,3	0,3	-29	0,4	0,4	0,0
M1-T33025	07-abr	1,6	0,8	1,0	0,1	3,0	-0,1
	16-abr	4,1	3,0	-27	-1,6	0,2	-0,3
	23-abr	3,1	1,2	-20	0,1	-0,1	-30
M1-T17771	03-abr	1,1	-3,5	-7	0,8	0,3	-1,8
	14-abr	2,2	15	-4,7	1,2	7	-2,0
	23-abr	3,5	0,2	-25	0,5	0,6	-30
MA-T17771	03-abr	2,1	-0,8	-10	-3,9	-7	-0,2
	14-abr	3,6	18	-7	-4,8	-10	0,0
	23-abr	3,7	0,2	-29	-0,7	-10	-29

Tabela B.9 - Desvios de temperatura nas TCUs no processo de mistura dos compostos mais produzidos nos misturador #11.

Composto	Data	Desvio (°C)					
		Câmara Superior			Câmara Inferior		
		Corpo	Rotor	Porta/ Martelo	Corpo	Rotor	Porta
M1-B00458	04-abr	3,5	-5	-10	1,1	0,3	0,7
	11-abr	1,3	-6	-10	0,1	0,1	10
	18-abr	0,4	0,2	-9	7	-11	11
M1-B00460	04-abr	2,5	5	-10	-16	-11	0,0
	11-abr	2,7	-4,9	-10	-17	-10	11
	18-abr	2,9	-2,7	-11	-5	-23	11
M2-B00460	04-abr	-4,0	-0,5	-11	1,0	0,9	8
	11-abr	-6	-3,9	-11	-0,4	0,3	10
	23-abr	-0,8	0,2	-11	7	14	10
M1-T01139	04-abr	0,7	-8	-9	-1,5	0,1	9
	11-abr	3,8	-4,9	-9	0,0	0,1	11
	23-abr	2,6	-2,9	-10	6	10	10

B.4 Consumo das resistências elétricas e bombas centrífugas

A análise da potência útil das resistências e bombas centrífugas foi feita mediante a potência instantânea apresentada nos contadores locais das TCUs. No caso das bombas registou-se a potência instantânea da TCU quando apenas as bombas estavam a funcionar. Relativamente às resistências mediu-se a potência da TCU quando apenas uma estava a funcionar, deduziu-se a potência das bombas e determinou-se a potência útil de cada uma.

Tabela B.10 - Potência medida das resistências elétricas e bombas centrífugas das TCU's das linhas #10 e #11 no mês de Abril de 2019.

			Potência (kW)	
			Misturador #10	Misturador #11
Câmara Superior	Resistências elétricas	Corpo	0	30
		Rotor	0	15,5
		Porta/Martelo	0	18,5
	Bombas centrífugas		4,4	5,5
Câmara Inferior		Corpo	0	15
		Rotor	0	15
		Porta	13,2	15
	Bombas centrífugas		4,2	5,5
Calandra		Sem-Fim	0	0
		Corpo	27,7	27,7
		Rolo Superior	22,5	22,7
		Rolo Inferior	44,5	0
	Bombas centrífugas		3,3	6,3

B.5 Análise do consumo das TCUs nas linhas #5, #6 e #7

Estes dados de consumo foram retirados dos contadores locais presentes nas TCUs.

Tabela B.11 - Valores experimentais do consumo de energia elétrica das TCUs do misturador das linhas #5, #6 e #7.

Data	Hora	Misturador	Energia (kWh)	Intervalo de tempo (h)	Potência média (kW)
05-04-2019	13:30	#5	904644,6	-	-
		#6	1941549,0		
		#7	203044,4		
08-04-2019	09:10	#5	907357,5	67,7	40,1
		#6	1947235,0		84,0
		#7	203684,8		9,5
09-04-2019	09:10	#5	908491,7	24,0	47,3
		#6	1949476,6		93,4
		#7	204014,5		13,7
15-04-2019	11:00	#5	915421,7	145,8	47,5
		#6	1962151,0		86,9
		#7	205771,3	149,8	11,7
24-04-2019	14:50	#5	919999,3	138,8	33,0
		#6	1975309		94,8
		#7	207809,1		14,7
30-04-2019	09:40	#5	925780,0	138,8	41,6
		#6	1987717		89,4
		#7	209768,7		14,1
09-05-2019	15:35	#5	938184,2	221,9	55,9
		#6	2007377		88,6
		#7	212720,9		13,3
14-05-2019	09:20	#5	943440,1	113,8	46,2
		#6	2017641		90,2
		#7	214347,4		14,3

Anexo C - Temperatura de doseamento de matérias primas

A poupança anual foi calculada determinando a energia que se poupava ao aquecer as matérias primas até à nova temperatura.

Tabela C.1 - Poupança anual após otimização das temperaturas de doseamento de matérias primas na linha #10.

Matéria Prima		Temperatura atual (°C)	Nova temperatura (°C)	Calor específico (KJ/(kg.K))	ΔT (°C)	Consumo anual (ton/ano)	Poupança anual (€/ano)
Óleos	CS 4105	80	-	0,39	—	5668	-
	CS 4104	80	70	2,02	10	507	250
Óleos lubrificantes	CS 4205	60	-	0,32	—	1235	-
	CS 6303	40	30	2,17	10	543	288
Antioxidantes	CA 6203	40	30	2,11	10	215	110
Borrachas líquidas	CE 1901	60	55	2,00	5	755	184
	CE 1929	40	-	2,00	—	15	-
	CE 1923	40	-	2,02	—	6	-
Resinas	CR 1112	60	50	1,71	10	492	205
	CR 1134	60	50	1,71	10	204	85
Silanos	CA 5510	30	20 (Ambiente)	1,75	10	789	337
	CA 5512	30	20 (ambiente)	1,75	10	770	329
						Total	1 791