



# **Auditoria Energética ao Processo de Misturação numa Indústria de Fabricação de Pneus**

**JOÃO GIL GONÇALVES SERRANO**

Julho de 2023

# **Auditoria Energética ao Processo de Misturação numa Indústria de Fabricação de Pneus**

João Gil Gonçalves Serrano

julho 2023

**Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Química, área de especialização em Energia e  
Biorrefinaria**

**Orientação no ISEP:** Prof. Doutora Paula Neto

Prof. Doutora Anabela Moura

**Orientação na Continental Mabor:** Engº Joaquim Rocha



*Para ser grande, sê inteiro: nada  
Teu exagera ou exclui.  
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.  
Assim em cada lago a lua toda  
Brilha, porque alta vive.*

**Ricardo Reis.**



## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à pessoa mais importante que alguma vez habitou o meu coração: Ao “PAI COSTA”. A inspiração para a realização desta dissertação e a determinação para continuar mesmo nos momentos mais difíceis foram graças a ti. Espero que te orgulhes de mim!

À minha mãe e madrinha, que me moldaram no homem que sou hoje e que sem a sua constância e permanência não teria sido possível finalizar o capítulo da minha vida que aqui se encerra.

Gostaria de agradecer à Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A, na pessoa do Eng<sup>o</sup> Joaquim Rocha que me incentivou a dar o melhor de mim e me fez evoluir tanto a nível científico e tecnológico como também a nível pessoal. Gostaria de agradecer igualmente à restante equipa do Departamento de Energia e Infraestruturas pela disponibilidade que sempre demonstraram durante o meu estágio, em especial ao Daniel Santos, à Eng<sup>a</sup> Filipa Trigo, à Eng<sup>a</sup> Fabienne Marwede, ao Eng<sup>o</sup> Orlando Couto, ao Eng<sup>o</sup> Diogo Rodrigues e ao senhor Mário Santos.

Às minhas orientadoras no ISEP – Prof.Doutora Paula Neto e Prof.Doutora Anabela Moura – pela disponibilidade e incansável ajuda que sempre me prestaram assim como pelas constantes palavras de incentivo não só durante realização da dissertação como também ao longo dos últimos cinco anos. Gostaria de estender este agradecimento à restante equipa docente do Departamento de Engenharia Química por me fazerem apaixonar pela área do conhecimento que é a Engenharia Química!.

Por último mas não menos importante, ao grupo fantástico de amigos que o ISEP me permitiu fazer e que me permitiram evoluir enormemente como ser humano e engenheiro.



## Sumário

A presente dissertação tem como objetivo fundamental a realização de uma auditoria energética ao processo de misturação na empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A, sita em Lousado, concelho de Vila Nova de Famalicão.

Iniciou-se o estudo com o levantamento energético total, para o ano de 2022, tendo-se determinado um consumo específico de energia igual a 269,8 kgep/ton. Na globalidade, o custo relacionado com o consumo de energia ascendeu a cerca de 65 milhões de euros.

Posteriormente efetuou-se o levantamento energético do setor da misturação, tendo-se concluído que este setor é o maior consumidor de energia contabilizando 45% em relação ao consumo total da fábrica. A quantificação do consumo de energia total neste setor revelou que a energia elétrica representa 97,8% e o consumo de vapor os restantes 2,23%. No setor da misturação, as misturadoras representam o maior consumo de energia elétrica (77,5%) sendo seguidas pela ventilação (6,12%) e pelos quadros de usos gerais (3,25%). O consumo de vapor destina-se apenas para aplicação de AVAC, sendo utilizado nas baterias de aquecimento das unidades de tratamento de ar e em termoventiladores. Determinou-se igualmente um consumo específico médio anual neste setor igual a 0,093 tep/ton.

Relativamente ao desenvolvimento de medidas de otimização energética, a proposta de aumento da produção em *One-Step Mixing* (OSM) em detrimento da produção *Master Batch+Final Mix* (MB+FM) para compostos de sílica permitirá poupar anualmente entre 163 € e 2291 € em custos relacionados com o consumo de energia elétrica nas misturadoras. A otimização de transformadores através da desativação parcial ou através da sua substituição permitirá poupar cerca de 9720 € anualmente e 37 000 € ao longo do tempo de vida médio dos transformadores, respetivamente. A desativação do consumo de vapor utilizado para descongelar borracha permitirá poupar cerca 37 000 € anuais, implementando-se por sua vez um sistema de recuperação de calor da corrente de condensados sujos através de um permutador de calor em espiral.

**Palavras-chave:** Auditoria Energética; Processo de Misturação; Otimização Energética; MB+FM vs OSM; Transformadores; Permutador de calor em espiral



## Abstract

The primary objective of this dissertation is to conduct an energy audit of the mixing process at Continental Mabor - Indústria de Pneus, S.A., located in Lousado, Vila Nova de Famalicão.

The study began with a comprehensive energy survey for the year 2022, which determined a specific energy consumption of 269.8 kgoe/ton. Overall, the cost associated with energy consumption amounted to approximately 65 million euros.

Subsequently, an energy survey of the mixing sector was conducted, revealing that this sector is the largest energy consumer, accounting for 45% of the total factory consumption. The quantification of total energy consumption in this sector showed that electrical energy represents 97.8%, while the remaining 2.23% is attributed to steam consumption. Within the mixing sector, mixers account for the highest electricity consumption (77.5%), followed by ventilation (6.12%) and general-purpose panels (3.25%). Steam consumption is solely used for HVAC applications, such as heating the air treatment units and thermofans. Additionally, the average specific annual consumption in this sector was determined to be 0.093 toe/ton.

Regarding the development of energy optimization measures, the proposal to increase production through the One-Step Mixing (OSM) method, instead of the Master Batch+Final Mix (MB+FM) method for silica compounds, would result in annual savings ranging from 163 € to 2,291 € in electricity consumption costs for the mixers. Optimizing transformers through partial deactivation or replacement would save approximately 9,720 € annually and 37,000 € over the average lifespan of the transformers, respectively. Discontinuing the use of steam for rubber thawing would save approximately 37,000 € per year, while implementing a heat recovery system from the dirty condensate stream through a spiral heat exchanger.

**Keywords:** Energy Audit; Mixing Process; Energy Optimization; MB+FM vs OSM; Transformers; Spiral Heat Exchanger.



## Índice Geral

|                                                           |              |
|-----------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Agradecimentos .....</b>                               | <b>iii</b>   |
| <b>Sumário.....</b>                                       | <b>v</b>     |
| <b>Abstract .....</b>                                     | <b>vii</b>   |
| <b>Índice de Figuras .....</b>                            | <b>xiii</b>  |
| <b>Índice de Tabelas .....</b>                            | <b>xviii</b> |
| <b>Lista de Siglas.....</b>                               | <b>xxii</b>  |
| <b>Lista de Símbolos .....</b>                            | <b>xxiii</b> |
| <b>Letras Gregas .....</b>                                | <b>xxiv</b>  |
| <b>1. Introdução .....</b>                                | <b>1</b>     |
| 1.1 Enquadramento da dissertação .....                    | 1            |
| 1.2 Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A .....     | 1            |
| 1.3 Panorama Energético mundial e nacional .....          | 4            |
| 1.4 Objetivos da dissertação .....                        | 7            |
| 1.5 Estrutura da Dissertação .....                        | 8            |
| <b>2. Produto e Processo de Fabrico .....</b>             | <b>9</b>     |
| 2.1 O pneu .....                                          | 9            |
| <b>2.1.1 Composição do Pneu.....</b>                      | <b>10</b>    |
| 2.2 Processo de Fabrico do Pneu .....                     | 13           |
| <b>2.2.1 Misturação.....</b>                              | <b>15</b>    |
| <b>2.2.3 Construção .....</b>                             | <b>16</b>    |
| <b>2.2.4 Vulcanização .....</b>                           | <b>17</b>    |
| <b>2.2.5 Inspeção Final .....</b>                         | <b>18</b>    |
| <b>3. Estado da arte: Misturação.....</b>                 | <b>19</b>    |
| 3.1 Fundamentos da mistura de compostos de borracha ..... | 19           |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3.1.1 Misturadores</b> .....                                                                                        | 21         |
| <b>3.1.2 Matérias-primas</b> .....                                                                                     | 24         |
| 3.2 Fases do processo de mistura.....                                                                                  | 26         |
| 3.3 Etapas do processo de misturação .....                                                                             | 28         |
| 3.4 Linhas de Misturação.....                                                                                          | 34         |
| <b>4. Gestão da Energia e Auditoria Energética</b> .....                                                               | <b>39</b>  |
| 4.1 Gestão da Energia.....                                                                                             | 39         |
| 4.2 Auditoria Energética.....                                                                                          | 40         |
| <b>5. Caracterização Energética Continental Mabor: Global e Setor da Misturação</b> .....                              | <b>43</b>  |
| 5.1 Levantamento Energético CMIP .....                                                                                 | 43         |
| 5.2 Levantamento Energético do Setor da Misturação.....                                                                | 47         |
| <b>5.2.1 Distribuição dos consumos de Energia Elétrica</b> .....                                                       | 52         |
| <b>5.2.2 Distribuição dos consumos de Vapor</b> .....                                                                  | 69         |
| 5.3 Cálculo e Análise do CEE de compostos de borracha.....                                                             | 70         |
| <b>5.3.1 Cálculo do CEE – Top 5 compostos de borracha</b> .....                                                        | 71         |
| <b>6. Otimização Energética no Setor da Misturação</b> .....                                                           | <b>73</b>  |
| 6.1 Avaliação da redução do CEE de compostos de borracha – Master Batch + Final Mix vs OSM .....                       | 74         |
| 6.2 Otimização de Transformadores.....                                                                                 | 76         |
| <b>6.2.1 Transformadores Elétricos</b> .....                                                                           | 76         |
| <b>6.2.2 Medidas de mitigação das perdas de transformadores no setor da misturação</b> .....                           | 80         |
| 6.3 Utilização do calor residual da corrente de condensados sujos para o descongelamento de polímeros de borracha..... | 85         |
| <b>7. Conclusões</b> .....                                                                                             | <b>95</b>  |
| <b>8. Proposta de Trabalhos Futuros</b> .....                                                                          | <b>99</b>  |
| <b>Referências Bibliográficas</b> .....                                                                                | <b>100</b> |

|                                                                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Anexos.....</b>                                                                                                                                 | <b>105</b> |
| <b>Anexo A – Caracterização Energética Global da CMIP.....</b>                                                                                     | <b>105</b> |
| Anexo A.1 – Levantamento Energético CMIP .....                                                                                                     | 105        |
| Anexo A.2 – Fatores de conversão de energia .....                                                                                                  | 108        |
| Anexo A.3 – Emissões CELE – Produção de Vapor.....                                                                                                 | 110        |
| Anexo A.4 – Produção e Consumos Específicos de Energia da CMIP.....                                                                                | 111        |
| <b>Anexo B – Caracterização Energética Setor Misturação.....</b>                                                                                   | <b>116</b> |
| Anexo B.1 .....                                                                                                                                    | 116        |
| Anexo B.2.....                                                                                                                                     | 117        |
| Anexo B.3 – Exemplo de cálculo dos CEE’s mensais no setor da misturação ..                                                                         | 118        |
| Anexo B.4 – Distribuição dos consumos de energia elétrica no setor da misturação .....                                                             | 119        |
| Anexo B.5 – Cálculo da Distribuição do Consumo de Energia Elétrica por tipo de misturadora .....                                                   | 122        |
| Anexo B.6 – Exemplo de cálculo dos CEE’s mensais das misturadoras .....                                                                            | 124        |
| Anexo B.7 – Distribuição do consumo de energia elétrica por tipo de equipamento presente na linha de misturação – Misturadoras <i>Tandem</i> ..... | 124        |
| Anexo B.8 – Ar comprimido .....                                                                                                                    | 125        |
| Anexo B.9 – Ventilação e Climatização.....                                                                                                         | 128        |
| Anexo B.10 – CEE compostos de Borracha.....                                                                                                        | 129        |
| <b>Anexo C – Otimização Energética Setor da Misturação.....</b>                                                                                    | <b>131</b> |
| Anexo C.1 – Avaliação da redução do CEE de compostos de borracha – Master Batch + Final Mix vs OSM .....                                           | 131        |
| Anexo C.2 – Otimização de transformadores – Medida 1 .....                                                                                         | 134        |
| Anexo C.3 – Otimização de transformadores – Medida 2 .....                                                                                         | 138        |
| Anexo C.4 – Aproveitamento do calor residual dos condensados sujos para descongelamento de borracha.....                                           | 144        |



## Índice de Figuras

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1</b> – Instalações da Continental Mabor, S.A sita na Rua Adelino Leitão, Nº 330, Lousado [5]. | 3  |
| <b>Figura 1.2</b> - Evolução do consumo de energia mundial, em Mtep, entre 1990 e 2021 [8].                | 5  |
| <b>Figura 1.3</b> - Evolução do consumo de energia, em Mep, em Portugal de 1990 a 2021 [8].                | 6  |
| <b>Figura 2.1</b> - Representação esquemática das camadas que constituem um pneu [14].                     | 10 |
| <b>Figura 2.2</b> – Distribuição dos ingredientes num pneu radial ligeiro [14].                            | 13 |
| <b>Figura 2.3</b> - Processo produtivo do pneu da Continental Mabor [15].                                  | 14 |
| <b>Figura 2.4</b> - Vista lateral (1) e frontal (2) da extrusora e calandra. Adaptado de: [38]             | 16 |
| <b>Figura 2.5</b> – Reticulações entre cadeias poliméricas através de moléculas de enxofre [17].           | 18 |
| <b>Figura 3.1</b> - Mistura distributiva [39]                                                              | 20 |
| <b>Figura 3.2</b> - Mistura dispersiva [39]                                                                | 20 |
| <b>Figura 3.3</b> - Mistura laminar [39]                                                                   | 21 |
| <b>Figura 3.4</b> - Elementos constituintes de um misturador Banbury. Adaptado de [7]                      | 21 |
| <b>Figura 3.5</b> - Subunidades de um misturador Banbury [20]                                              | 21 |
| <b>Figura 3.6</b> - Vista em corte de rotores tangenciais [20]                                             | 22 |
| <b>Figura 3.7</b> - Vista em corte de rotores intermeshing [20].                                           | 23 |
| <b>Figura 3.8</b> - Borracha SBR [21]                                                                      | 24 |
| <b>Figura 3.9</b> - Borracha polibutadieno [21]                                                            | 24 |
| <b>Figura 3.10</b> - Borracha Natural [21]                                                                 | 24 |
| <b>Figura 3.12</b> - Sílica precipitada [39]                                                               | 25 |
| <b>Figura 3.11</b> - Negro de fumo [21]                                                                    | 25 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 3.13</b> - Variação da temperatura e do torque ao longo do tempo do processo de misturação [39] .....                     | 27 |
| <b>Figura 3.14</b> - Fluxograma das etapas no processo de misturação [7].....                                                       | 28 |
| <b>Figura 3.15</b> - Passadeira rolante .....                                                                                       | 29 |
| <b>Figura 3.16</b> - Sistema de doseamento automático de pigmentos.....                                                             | 30 |
| <b>Figura 3.17</b> - Cilindro volumétrico de doseamento de óleos e silanos.....                                                     | 30 |
| <b>Figura 3.18</b> - Diagrama exemplificativo do sistema de transporte e doseamento de óleos e silanos [22] .....                   | 31 |
| <b>Figura 3.19</b> - (1) Transporte de negro de fumo desde o camião cisterna até aos silos mensais; .....                           | 31 |
| <b>Figura 3.20</b> - Sistema de doseamento e transporte de negro de fumo:.....                                                      | 32 |
| <b>Figura 3.21</b> - Misturador Tandem [20].....                                                                                    | 33 |
| <b>Figura 3.22</b> - Linha de misturação. Adaptado de: [19].....                                                                    | 34 |
| <b>Figura 3.23</b> - Diagrama P&I de uma zona do misturador de uma TCU [16]. .....                                                  | 36 |
| <b>Figura 3.24</b> - Coletor de aspiração e filtro de mangas (estrutura de cor verde) [7].                                          | 37 |
| <br>                                                                                                                                |    |
| <b>Figura 4.1</b> - Etapas de uma auditoria energética [23].....                                                                    | 42 |
| <br>                                                                                                                                |    |
| <b>Figura 5.1</b> - Repartição do consumo de energia no ano de 2022 na CMIP .....                                                   | 45 |
| <b>Figura 5.2</b> – Distribuição dos custos por forma de energia primária no ano de 2022 na CMIP.....                               | 45 |
| <b>Figura 5.3</b> - Custos associados à produção de vapor.....                                                                      | 46 |
| <b>Figura 5.4</b> - Repartição do consumo de energia no setor da misturação no ano de 2022 .....                                    | 48 |
| <b>Figura 5.5</b> - Comparação do consumo de energia elétrica no setor da misturação em relação ao consumo homólogo pela CMIP ..... | 48 |
| <b>Figura 5.6</b> - Consumo de energia mensal, em tep, na área da misturação no ano de 2022 .....                                   | 49 |
| <b>Figura 5.7</b> - Produção mensal, em ton, de compostos de borracha no ano de 2022                                                | 49 |
| <b>Figura 5.8</b> - Consumos específicos mensais, em tep/ton, no setor da misturação para o ano de 2022.....                        | 50 |

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 5.9</b> - Correlação entre a energia consumida e a produção de compostos de borracha no setor da misturação no ano de 2022.....                              | 51 |
| <b>Figura 5.10</b> - Distribuição percentual dos consumos de energia elétrica no setor da misturação no ano de 2022 .....                                              | 53 |
| <b>Figura 5.11</b> - Distribuição do consumo de energia elétrica das misturadoras por tipo de linha de misturação .....                                                | 54 |
| <b>Figura 5.12</b> - Consumo de energia elétrica, em tep, por misturadora no ano de 2022 .....                                                                         | 55 |
| <b>Figura 5.13</b> - Produção, em ton, de compostos de borracha por misturadora no ano de 2022 .....                                                                   | 55 |
| <b>Figura 5.14</b> - Consumos específicos de energia, em tep/ton, de cada misturadora no ano de 2022.....                                                              | 56 |
| <b>Figura 5.15</b> - Distribuição do consumo de energia elétrica por tipo de equipamento nas misturadoras Tandem .....                                                 | 57 |
| <b>Figura 5.16</b> - Distribuição do consumo de energia elétrica por central de ar comprimido para o transporte de negro de fumo.....                                  | 59 |
| <b>Figura 5.17</b> - Consumo de energia elétrica, em kWh, de cada compressor na central de negro de fumo da misturação antiga no ano de 2022 .....                     | 59 |
| <b>Figura 5.18</b> - Produção de ar comprimido, em Nm <sup>3</sup> , de cada compressor na central de negro de fumo da misturação antiga no ano de 2022 .....          | 60 |
| <b>Figura 5.19</b> - Consumos específicos de energia, em kWh/Nm <sup>3</sup> , de cada compressor na central de negro de fumo da misturação antiga no ano de 2022..... | 60 |
| <b>Figura 5.20</b> - Distribuição percentual dos consumos de energia elétrica por tipo de iluminação no ano de 2022.....                                               | 62 |
| <b>Figura 5.21</b> - Esquema típico representativo de uma UTA .....                                                                                                    | 63 |
| <b>Figura 6.1</b> - Transformador elétrico [27].....                                                                                                                   | 77 |
| <b>Figura 6.2</b> - Transformador de distribuição do tipo seco [27].....                                                                                               | 78 |
| <b>Figura 6.3</b> - Implantação dos PT's na CMIP .....                                                                                                                 | 81 |
| <b>Figura 6.4</b> - Diagrama P&ID - Aproveitamento de calor dos condensados sujos para descongelamento de borracha.....                                                | 88 |
| <b>Figura 6.5</b> - Paleta GoodPack™ [32] .....                                                                                                                        | 89 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 6.6</b> - Esquema ilustrativo do permutador de calor em espiral Alfa Laval ALSHE LTL 4L <sup>TM</sup> [34] .....                           | 92  |
| <b>Figura 6.7</b> - Permutador de calor em espiral Alfa Laval ALSHE LTL 4L <sup>TM</sup> [34] .....                                                  | 92  |
| <b>Figura 6.8</b> - Termoventilador Franco SRL - AP80 [41] .....                                                                                     | 93  |
| <br>                                                                                                                                                 |     |
| <b>Figura C.1</b> - Informação das perdas em vazio e em carga de transformadores de distribuição do tipo seco 15kV/400V Schneider Eletric [42] ..... | 135 |
| <b>Figura C.2</b> - Informação das perdas em carga e em vazio de transformadores tipo seco 15kV/400V da EFACEC .....                                 | 135 |
| <b>Figura C.3</b> - Ficha Técnica do transformador Trihal dry-type 1600 kVA (15kV/400V) - Parte 1 [44] .....                                         | 140 |
| <b>Figura C.4</b> - Ficha técnica do transformador Trihal dry-type 1600 kVA (15kV/400V) – Parte 2 [44] .....                                         | 141 |
| <b>Figura C.5</b> – Custo de aquisição do transformador Trihal dry-type 1600 kVA (15kV/400V) [44] .....                                              | 141 |
| <b>Figura C.6</b> - Características das paletes GoodPack <sup>TM</sup> [32] .....                                                                    | 144 |
| <b>Figura C.7</b> - Projeto do permutador de calor ALSHE LTL 4L <sup>TM</sup> - Alfa Laval ....                                                      | 149 |
| <b>Figura C.8</b> – Diagrama e dimensões do permutador de calor – Alfa Laval ALSHE LT 4L <sup>TM</sup> .....                                         | 150 |
| <b>Figura C.9</b> - Proposta de orçamento do permutador de calor – Alfa Laval ALSHE LT 4L <sup>TM</sup> .....                                        | 151 |
| <b>Figura C.10</b> - Características do termoventilador Franco SRL AP80 .....                                                                        | 151 |
| <b>Figura C.11</b> - Características do difusor de fluxo e suporte .....                                                                             | 151 |



## Índice de Tabelas

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 2.1</b> – Estruturas constituintes de um pneu [14].....                                                                                                          | 11 |
| <b>Tabela 5.1</b> – Consumo de energia e custos respetivos no ano de 2022 na CMIP ...                                                                                      | 44 |
| <b>Tabela 5.2</b> - Consumo específico total e por forma de energia primária da CMIP em 2022 .....                                                                         | 47 |
| <b>Tabela 5.3</b> - Consumo de energia no setor da misturação no ano de 2022.....                                                                                          | 47 |
| <b>Tabela 5.4</b> - Distribuição dos consumos de energia elétrica e custos associados no setor da misturação no ano de 2022.....                                           | 52 |
| <b>Tabela 5.5</b> - Características gerais dos compressores da central de negro de fumo da área da misturação antiga .....                                                 | 58 |
| <b>Tabela 5.6</b> - Características gerais dos compressores da central de negro de fumo na área da misturação nova .....                                                   | 58 |
| <b>Tabela 5.7</b> - Consumos de energia elétrica de cada central de ar comprimido para o transporte de negro de fumo .....                                                 | 59 |
| <b>Tabela 5.8</b> -Consumo e custo de energia elétrica por tipo de iluminação no setor da misturação no ano de 2022 .....                                                  | 62 |
| <b>Tabela 5.9</b> - Características energéticas das UTA's no setor da misturação.....                                                                                      | 65 |
| <b>Tabela 5.10</b> - Características energéticas das torres de arrefecimento associadas à climatização no setor da misturação .....                                        | 65 |
| <b>Tabela 5.11</b> - Características energéticas dos ventiladores de extração no setor da misturação.....                                                                  | 66 |
| <b>Tabela 5.12</b> - Consumo dos quadro gerais de ventilação, em kWh e tep, no setor da misturação no ano de 2022 .....                                                    | 67 |
| <b>Tabela 5.13</b> - Distribuição dos consumos de energia elétrica por tipo de equipamento de ventilação, em kWh e tep, no setor da misturação durante o ano de 2022 ..... | 68 |
| <b>Tabela 5.14</b> - Distribuição dos consumos de vapor por tipo de equipamento, em kg/h, no setor da misturação .....                                                     | 70 |
| <b>Tabela 5. 15</b> - CEE's dos 5 compostos mais produzidos entre 17 e 22 de junho de 2023 na CMIP.....                                                                    | 72 |

|                                                                                                                                                |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Tabela 6.1</b> - Compostos de borracha produzidos por MB+FM e OSM .....                                                                     | 74      |
| <b>Tabela 6.2</b> – Poupança por tonelada de compostos de borracha produzidos por MB+FM vs OSM.....                                            | 75      |
| <b>Tabela 6.3</b> - Otimização do custo da energia associado à produção de compostos de sílica MB+FM vs OSM .....                              | 75      |
| <b>Tabela 6.4</b> - Transformadores selecionados para otimização no setor da misturação .....                                                  | 81      |
| <b>Tabela 6.5</b> - Potência média e máxima, em kW, e fator de carga (%) dos transformadores no setor da misturação .....                      | 82      |
| <b>Tabela 6.6</b> - Otimização energética de transformadores no setor da misturação ....                                                       | 83      |
| <b>Tabela 6.7</b> - Poupança anual da otimização de transformadores no setor da misturação .....                                               | 84      |
| <b>Tabela 6.8</b> - Análise económica - Substituição dos transformadores 10.1 e 10.2 (2500 kVA) por transformadores de 1600 kVA .....          | 85      |
| <b>Tabela 6.9</b> - Características da corrente de condensados sujos .....                                                                     | 88      |
| <b>Tabela 6.10</b> - Características da corrente de água descalcificada .....                                                                  | 91      |
| <b>Tabela 6.11</b> - Análise Económica - Aproveitamento dos condensados sujos para o descongelamento de borracha.....                          | 93      |
| <br><b>Tabela A.1</b> - Consumo e Custo mensal da energia consumida pela CMIP no ano de 2022 .....                                             | <br>106 |
| <b>Tabela A.2</b> - Consumo de ar comprimido, em kWh, pela CMIP no ano de 2022.                                                                | 107     |
| <b>Tabela A.3</b> -Licenças CELE mensais atribuídas à CMIP durante o ano de 2022, em tonCO <sub>2</sub> e, e o respetivo custo associado ..... | 110     |
| <b>Tabela A.4</b> - Produção mensal alcançada pela CMIP, durante o ano de 2022, em quantidade de pneus e toneladas.....                        | 111     |
| <b>Tabela A.5</b> - Consumos específico mensais e anual por tipo de energia primária e global, em kWh/ton, da CMIP no ano de 2022 .....        | 112     |
| <b>Tabela A.6</b> - Consumos específico mensais e anual por tipo de energia primária, em kgep/ton, da CMIP no ano de 2022 .....                | 112     |

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela B.1</b> - Consumos mensais de Energia Elétrica e Vapor no setor da misturação no ano de 2022.....                                                        | 116 |
| <b>Tabela B.2</b> - Consumo mensal de Energia Elétrica por secção no setor da misturação no ano de 2022.....                                                       | 120 |
| <b>Tabela B.3</b> - Consumo anual e por tipo de iluminação no setor da misturação no ano de 2022 .....                                                             | 121 |
| <b>Tabela B.4</b> - Consumo de Energia Elétrica, em kWh, e contribuição percentual dos equipamentos presentes nas linhas de misturação Tandem no ano de 2022 ..... | 125 |
| <b>Tabela B.5</b> - CEE's médios diários para o composto B entre 17 e 22 de junho de 2023 .....                                                                    | 131 |
| <br>                                                                                                                                                               |     |
| <b>Tabela C.1</b> - Resistências de convecção interior e exterior de transferência de calor em elementos opacos .....                                              | 147 |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

## Lista de Siglas

ACS - Automatic Storage Compound

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

C/V - Carga/Vazio

CEE - Consumo Específico de Energia

CIE - Instalações Consumidoras Intensivas de Energia

CMIP - Continental Mabor - Indústria de Pneus

EAC's - Energy Attribute Certificates

ELE - Energia Elétrica

FM - Final Mix

GEE - Gases de Efeito de Estufa

LED - Light Emitting Diode

M - Masticação

MB - Master Batch

ML - Linha de misturação

MMS - Mixing Management System

OH<sup>-</sup> - Grupo Hidroxilo

OSM - One-Step Mixing

P&ID - Process and Instrumentation Diagram

PLC - Computador Lógico Programável

PRI - Período de Retorno do Investimento

PT - Posto de Transformação

Auditoria Energética ao Processo de Misturação

QGD - Quadro Geral de Desenfumagem

QGV - Quadro Geral de Ventilação

QUG - Quadro d Usos Gerais

R - Remill

SGCIE - Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

SUV's - Sports Utility Vehicle

TA - Torre de Arrefecimento

TCO - Total Cost Ownership

TCU - Temperature Control Unit

UHP - Ultra High Performance

UTA - Unidade de Tratamento de Ar

UUHP - Ultra Ultra High Performance

VAB - Valor Atual Bruto

VEDM - Ventilador de Desenfumagem

VEM - Ventilador de Extração

VSD - Variable Speed Drive

## Lista de Símbolos

$A$  – Área [ $m^2$ ]

$B$  – Fator de capitalização do custo de energia elétrica

$C_p$  – Capacidade calorífica a pressão constante [ $kJ/kg.K$ ]

$H$  – Entalpia [ $kJ/kg$ ]

$I$  – Investimento [€]

$i$  – Intensidade de corrente elétrica [A]

Auditoria Energética ao Processo de Misturação

$K$  - Fator de carga [%]

$m$  – Massa [kg]

$\dot{m}$  – Caudal mássico [kg/h; kg/dia]

$n$  – Tempo de vida médio de um transformador [anos]

$P$  – Potência elétrica [kW; kVA]

$p$  – Enrolamento primário

$\dot{q}$  - Potência térmica [kW]

$R_{se}$  – Resistência à transferência de calor por convecção externa [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]

$R_{si}$  – Resistência à transferência de calor por convecção interna [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]

$R_{cond}$  – Resistência à transferência de calor por condução [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]

$s$  – Enrolamento secundário

$T_i$  – Temperatura inicial [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_f$  – Temperatura final [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$U$  – Tensão elétrica [kV]

$V$  – Volume [ $\text{m}^3$ ]

$\dot{V}$  – Caudal Volumétrico [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

## Letras Gregas

$\Delta T$  – Diferença de Temperatura

$\Delta H_v$  – Calor latente [kJ/kg]

$\theta_v$  – Ângulo de Fase da Tensão [rad]

$\theta_i$  – Ângulo de Fase da corrente [rad]

$\rho$  – Massa Volúmica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]





## 1. Introdução

No presente capítulo realiza-se o enquadramento da dissertação, uma breve apresentação da empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A, uma visão geral do panorama energético mundial e nacional e, por fim, delineiam-se os objetivos pretendidos assim como a estrutura do trabalho.

### 1.1 Enquadramento da dissertação

O desenvolvimento desta dissertação encontra-se inserida na unidade curricular de Dissertação/Estágio, contendo 34 ECTS do 2º ano, 2º semestre do Mestrado em Engenharia Química ramo opcional Energia e Biorrefinaria.

O projeto subjacente à realização desta dissertação tem como tema “Auditoria Energética ao Processo de Misturação numa Indústria de Fabricação de Pneus”. O objetivo primordial deste trabalho passou, numa primeira fase, pela análise do processo de mistura seguida pela realização do levantamento energético e posteriormente a conceção e implementação de medidas de modo a reduzir o consumo de energia associado.

### 1.2 Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A

Em 1938, o conde da Covilhã, Dr. Júlio Anahori de Quental Calheiros, cria a empresa Mabor – Manufatura Nacional de Borracha, S.A, começando-se a construção da fábrica de pneus em Lousado, concelho de Vila Nova de Famalicão, tendo o Banco do Porto e a *General Tire*, sediada nos Estado Unidos da América (EUA), como acionistas. O nome “Mabor” tem a sua origem no nome “**M**aria **F**ernandes **B**orges”, esposa de Francisco Borges, sócio do Banco do Porto que financiou grande parte da construção da fábrica [1].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

A fábrica fica apenas concluída em 1946, após a Segunda Guerra Mundial, com o primeiro pneu para automóvel a sair da fábrica a 6 de abril do mesmo ano, fazendo parte do modelo “*Silent Safety*”. Nos anos 50 do século XX, a Mabor torna-se milionária, detendo o monopólio da produção de pneus a nível nacional, com a produção de pneus a ascender a 1 milhão todos os anos desta década. Nos anos 70, a Mabor expande a sua área de negócio para o norte da Europa, com a criação de pneu de inverno “*Winter-Jet*” [1].

Em 1989, o grupo Continental AG, sediado em Hannover – Alemanha, adquire parte do capital da Mabor, criando-se assim a “Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A”.

A 2 de julho de 1990 dá-se o arranque industrial da fábrica, iniciando-se o projeto de reestruturação com o objetivo de produzir apenas pneus para viaturas de passageiros e comerciais. Em 1993, o grupo Continental AG adquire a restante participação da Mabor, passando assim a deter 100% do capital da empresa. No ano de 1994, a produção média diária ascendia já a 18 000 pneus, sendo a grande parte deles destinados ao mercado exportador [1, 2].

No início do século XXI (2002) a Continental Mabor expandiu a nave industrial dedicada ao fabrico de pneus ligeiros, e em 2005, arrancou com um novo projeto que permitiu começar a produção de pneus destinados a SUV’s (*Sports Utility Vehicle*) [3].

Em 2009 a empresa introduziu a produção de pneus com a tecnologia “ContiSeal” (tecnologia anti-furo) e, em 2013, iniciou o fabrico de pneus de ultra-alta performance UHP (*Ultra High Performance*) [3].

Nos anos posteriores continuou-se a tendência expansionista registada até então com o desenvolvimento da produção de pneus agrícolas (AGRO), em 2017. Foi então criada uma área destinada à pesquisa e desenvolvimento. No ano de 2019 alargou-se novamente o leque de produtos com a manufatura de pneus OTR (*Off The Road*), destinados a aplicações especiais em máquinas portuárias e movimentações de terras [3].

Atualmente, a Continental Mabor é das empresas mais produtivas do grupo Continental AG, sendo a 4ª maior exportadora a nível nacional, registando-se, de acordo com dados mais recentes de 2019, uma produção anual superior a 18 milhões de pneus ligeiros e mais de 25 mil pneus agrícolas, representando uma faturação superior a 893 milhões de euros. Do volume total das vendas efetuadas, 99% tem como destino a

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

exportação, estando 65% repartidas pelo designado “mercado de substituição” e as restantes distribuídas pelas linhas de montagens do setor automóvel [4].

A unidade da Continental Mabor, em Lousado, possui uma área de superfície de cerca 650.000 m<sup>2</sup>, conta aproximadamente com 2600 colaboradores e opera 24 horas por dia, 350 dias por ano [4]. Na **Figura 1.1** apresentam-se as instalações atuais da empresa [5].



**Figura 1.1** – Instalações da Continental Mabor, S.A sita na Rua Adelino Leitão, Nº 330, Lousado [5].

Além dos tipos de pneus mencionados, a empresa ainda fabrica pneus com a tecnologia ContiSilent (silenciosos na rodagem) e UUHP (*Ultra Ultra High Performance*) [3].

O sucesso da Continental Mabor não é obra do acaso, estando por isso assente numa política empresarial robusta e ao mesmo tempo inovadora que culmina no lema: “**Ser LÍDER no setor de pneus da Continental**” [6].

A filosofia **LÍDER** da Continental Mabor encontra-se bem definida e estruturada, estando assente no seguinte conjunto de valores [6]:

- Lousado eficiente;**
- Inova e antecipa as necessidades dos clientes;**
- Desenvolve produtos de alta tecnologia;**
- Excelente no conhecimento e nos processos;**
- Rentável de forma sustentada.**

Através da filosofia mencionada, a Continental Mabor tem assim como missão “criar valor e crescer de forma sustentada e socialmente responsável; satisfazer os clientes com produtos, serviços e soluções de alta tecnologia; privilegiar a melhoria contínua com vista à eficiência, qualidade, flexibilidade e inovação; promover a competência, motivação e excelência dos colaboradores” [6].

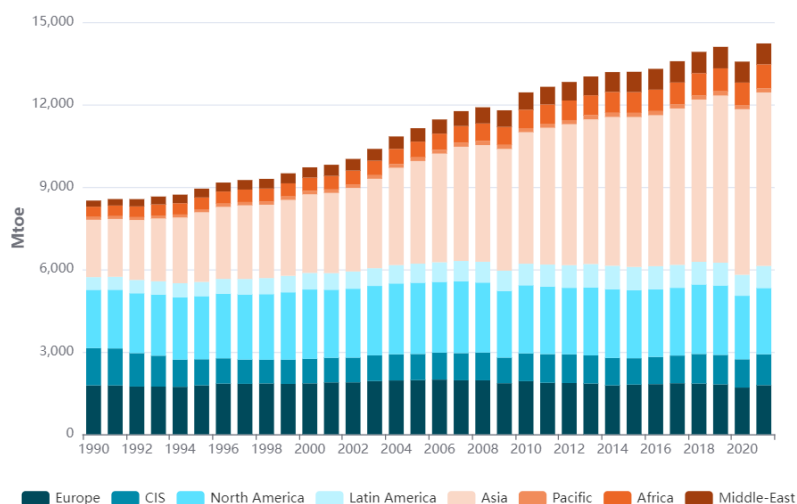
A unidade da Continental Mabor em Lousado é igualmente um exemplo a seguir no que concerne aos padrões de sustentabilidade atuais, através, por exemplo, da geração de 2 GWh por ano de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, pelo aproveitamento de resíduos e pela redução de garrafas de plástico com a instalação de dispensadores de água. Ademais, a fábrica cumpre com todas as normas nacionais e internacionais relativamente à Saúde Operacional, Segurança e Ambiente – ISO 45001 e ISO 14001, respetivamente [4].

### **1.3 Panorama Energético mundial e nacional**

O contínuo crescimento da população mundial encontra-se indubitavelmente conectado à capacidade em adquirir recursos e produzir bens por forma a suprir as necessidades existentes. Deste modo, diversos setores da atividade humana, como por exemplo, o setor doméstico, industrial, dos transportes e de serviços, têm necessitado de expandir a sua ação, o que consequentemente provoca o aumento do consumo de energia a nível global [7].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Na **Figura 1.2** pode-se observar a evolução do consumo de energia, em milhões de tonelada equivalente de petróleo (Mtep), a nível mundial, desde o ano de 1990 até aos dados mais recentes obtidos em 2021, considerando-se a contribuição de cada região do globo [8].



**Figura 1.2** - Evolução do consumo de energia mundial, em Mtep, entre 1990 e 2021 [8].

Nota: CIS – Commonwealth of Independent States.

Analisando a **Figura 1.2**, verifica-se que o crescimento do consumo energético a nível global tem mantido uma tendência crescente desde 1990 até à atualidade, com o consumo em 2021 a ascender a 14 221 Mtep, representando um aumento de 5% face ao ano de 2020. Todavia, este aumento não é, de todo, representativo da tendência da década transata, onde a média do crescimento do consumo energético se situou em 2%/ano. Obviamente que a justificação para este facto foi devido à pandemia da COVID-19 que assolou o planeta, principalmente no ano de 2020 [8].

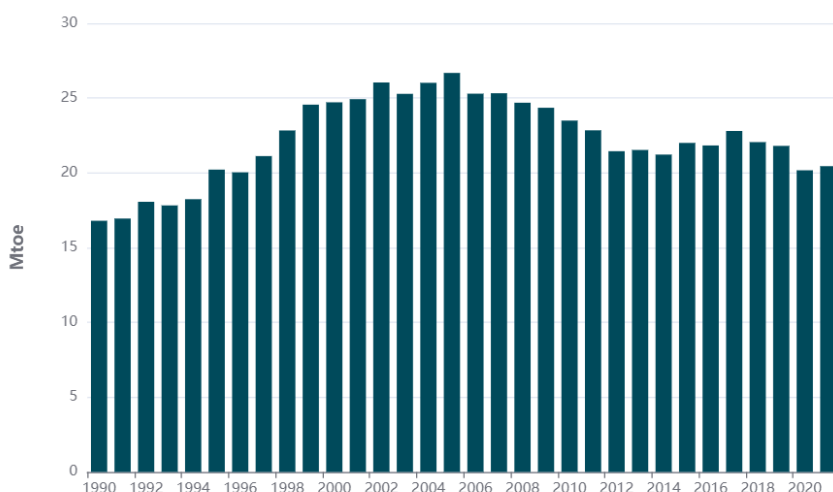
Em termos comparativos, 25% do total da energia consumida no ano de 2021 foi atribuída à China, ocupando assim a posição cimeira, seguida em segundo e terceiro lugares pelos Estados Unidos da América e Índia, respetivamente [8].

O petróleo manteve-se como a fonte de energia mais utilizada, com 29% de toda a energia consumida proveniente deste recurso. O gás natural e o carvão seguem de perto, com o primeiro a chegar aos 24% e o último aos 27%. Por último, mas não menos importante, a biomassa e a energia elétrica contabilizam ambas 10% [8].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

A partir sensivelmente do ano de 2009, o crescimento do consumo energético sofreu uma desaceleração, muito por força da gravíssima recessão económica mundial de 2008, mas também pela maior consciencialização de se efetuar uma gestão eficiente dos recursos energéticos que permitisse reduzir os custos associados, tanto para as famílias como para as indústrias e ao mesmo tempo mitigar a emissão de gases de efeitos de estufa para a atmosfera, sobretudo através da utilização de combustíveis fósseis [7].

No panorama nacional, através da análise da **Figura 1.3**, o consumo total de energia em 2021 foi igual a, aproximadamente, 20 Mtep, contabilizando assim uma redução de nove pontos percentuais face a 2019 [8].



**Figura 1.3** - Evolução do consumo de energia, em Mep, em Portugal de 1990 a 2021 [8].

A **Figura 1.3** representa ainda a evolução do consumo energético nacional desde o ano de 1990 até ao ano de 2021. Observa-se que a partir do ano de 2005 o consumo energético nacional tem vindo a diminuir gradualmente, com especial enfoque no período [2011-2014]. A justificação para este fenómeno deveu-se essencialmente à forte contração da economia nacional, período que ficou conhecido como “anos da TROIKA” [7, 8].

Através da análise do consumo desagregado de energia em 2021 verificou-se que a cota de petróleo foi de 42% e a de gás natural de 25%, sendo estas as duas fontes de energia mais representativas. O consumo de energia elétrica e de biomassa situou-se, respetivamente, em 14% e 17%, com o consumo de carvão representando apenas 1% [8]. A fatia do consumo de energia a partir do carvão ainda se tornará mais diluída ou até

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

mesmo nula em 2022 com o encerramento da central termoelétrica do Pego, em dezembro de 2021 [9].

Portugal é um dos exemplos a seguir tanto a nível europeu como a nível mundial pela elevada incorporação de energias renováveis no “leque” energético para a produção de energia elétrica. Em 2021, esse valor atingiu 59%, sendo 23% associada à energia hídrica, 26% à energia eólica, 7% à energia da biomassa e 3,5% à energia solar fotovoltaica [9].

Relativamente ao ano de 2022, ainda não se encontram compilados os dados referentes aos consumos energéticos realizados. No entanto, torna-se expectável que a cota de gás natural seja inferior quando comparada ao ano de 2021 devido à guerra na Ucrânia. Este conflito provocou uma disrupção nos mercados energéticos com o custo de gás natural a atingir um pico histórico de 346 €/MWh [10], em agosto de 2022, o custo do barril de petróleo a superar a fasquia dos 100 dólares norte-americanos [11] e a energia elétrica no mercado ibérico (MIBEL) a tocar no patamar dos 500 €/MWh [12], a 7 de março de 2022. Só mais recentemente, em janeiro do presente ano, os custos associados à energia começaram a regredir para valores pré-guerra [10].

Este fenómeno provocou a que muitas famílias e empresas ainda se encontrem num estado de franca vulnerabilidade e incerteza, pelo que a necessidade de racionalizar consumos através de sistemas de gestão de energia eficientes torna-se imperativo. De forma concomitante, a intensificação da utilização de energia a partir de fontes renováveis desempenha igualmente um papel fundamental neste processo, fomentando-se desta forma um crescimento sustentável e sem risco de rutura.

## 1.4 Objetivos da dissertação

A realização da presente dissertação tem como objetivo principal a realização de uma auditoria energética ao processo de misturação da Continental Mabor que consiste nas seguintes etapas:

- Conhecer o processo produtivo da empresa, com especial ênfase no processo de misturação (produção de compostos de borracha);

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

- Conhecer a composição dos 5 principais compostos de borracha produzidos na empresa;
- Determinar o consumo específico de energia dos 5 tipos principais de compostos de borracha, considerando todos os subprocessos a montante e a jusante do processo de misturação e tendo em conta outros consumos de energia, tais como, climatização, ventilação, iluminação e de vapor;
- Identificar medidas de racionalização dos consumos de energia elétrica e energia térmica (vapor).

## 1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação aqui desenvolvida é constituída por 8 capítulos, apresentando a seguinte distribuição de conteúdos:

No primeiro capítulo realiza-se um enquadramento do tema a desenvolver, uma breve apresentação da empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A, uma descrição sumária do panorama energético mundial e nacional e, por fim, apresentam-se os objetivos inerentes à realização da presente dissertação.

No segundo capítulo efetua-se a descrição do processo produtivo da Continental Mabor para a produção do produto final, o pneu.

O terceiro capítulo dedica-se exclusivamente a detalhar o processo de misturação, incluindo a descrição e funcionamento das Unidades de Controlo de Temperatura (TCU's) e do sistema de transporte de matérias-primas, com especial relevo para o negro de fumo.

No Capítulo 4 aborda-se o conceito de auditoria energética e no capítulo 5 faz-se a caracterização energética, para o ano de 2022, da Continental Mabor e concretamente do setor da misturação, apresentando os consumos específicos dos 5 compostos de borracha mais produzidos.

No Capítulo 6 apresentam-se medidas de otimização energética no setor da misturação assim como os resultados obtidos.

No Capítulo 7 referem-se as principais conclusões e no Capítulo 8 apresentam-se propostas para trabalhos futuros.

## 2. Produto e Processo de Fabrico

Neste capítulo abordam-se conceitos transversais sobre o produto principal produzido pela Continental Mabor, o pneu e o seu processo de fabrico, inerentes à compreensão do tema sobre o qual esta dissertação se debate.

### 2.1 O pneu

Em 1839, Charles Goodyear desenvolveu o processo de vulcanização que consiste no aquecimento de borracha, inicialmente viscosa ou rígida dependendo da temperatura, com enxofre transformando-a num material com propriedades adequadas para a produção de pneus [13].

O advento desta descoberta impulsionou enormemente o desenvolvimento científico e tecnológico da produção de pneus a nível industrial, chegando aos dias de hoje como um processo de fabrico complexo e minucioso, indo desde a preparação das matérias-primas até à produção ou incorporação de outros elementos fundamentais à construção do produto final [13].

Em termos funcionais, o pneu constitui um componente fundamental dos meios transportes, sobretudo os terrestres. De um modo geral torna-se essencial que qualquer pneu garanta o cumprimento de quatro funções básicas [7, 14]:

- Manter um volume de ar comprimido que sustente a carga do veículo;
- Capacidade de transmitir forças longitudinais, das quais são exemplo, a tração, travagem e aceleração à superfície da estrada;
- Transmissão de forças laterais permitindo proporcionar estabilidade direcional quando se altera ou se mantém a direção na estrada;

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

- Auxiliar e complementar a suspensão do veículo através da absorção de irregularidades na superfície da estrada.

A especificação e qualidade associados a um pneu necessitam de seguir um certo conjunto de requisitos, como por exemplo [14]:

- Económicos: tempo de vida útil e desgaste associado, resistência ao rolamento e o respetivo preço;
- Ambientais: emissão de ruído, necessidade de materiais que cumpram os requisitos técnicos e legais e a profundidade de piso no termo de vida útil;
- Conforto: absorção de impactos, ruído interior, segurança e conforto nas manobras e uniformidade;
- Segurança: distância de travagem, tração (piso seco, molhado, neve ou gelo), estabilidade ao mudar de direções, durabilidade, resistência ao envelhecimento e robustez.

### 2.1.1 Composição do Pneu

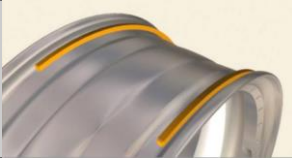
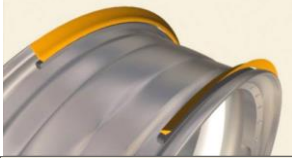
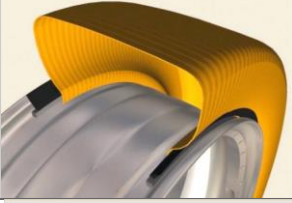
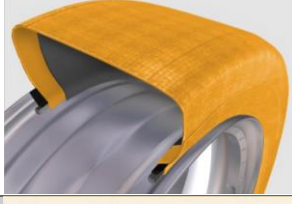
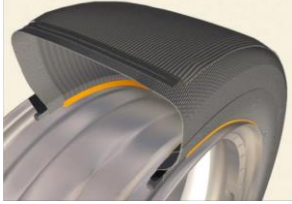
À vista desarmada, o pneu pode aparentar possuir uma construção e estrutura rudimentar, mas, na verdade, na sua composição encontram-se incorporadas diferentes camadas com funções distintas e altamente específicas. Assim, na **Figura 2.1** podem-se observar as diferentes camadas que constituem um pneu [7, 14].

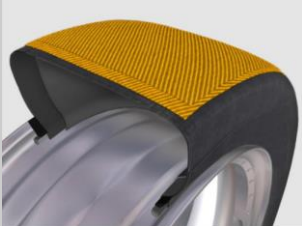
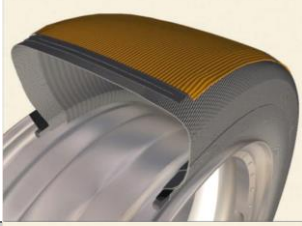
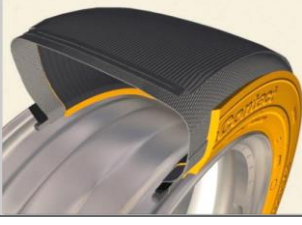


**Figura 2.1** - Representação esquemática das camadas que constituem um pneu [14].

Observando-se a **Figura 2.1** torna-se perceptível que um pneu é constituído por 10 diferentes estruturas, com cada uma apresentando características e funcionalidades variadas e específicas. De forma a compreender melhor a inserção de cada estrutura na construção de um pneu apresenta-se, na **Tabela 2.1**, cada camada de forma individual, descrevendo-se o material e/ou materiais utilizados na sua construção, assim como a respetiva função.

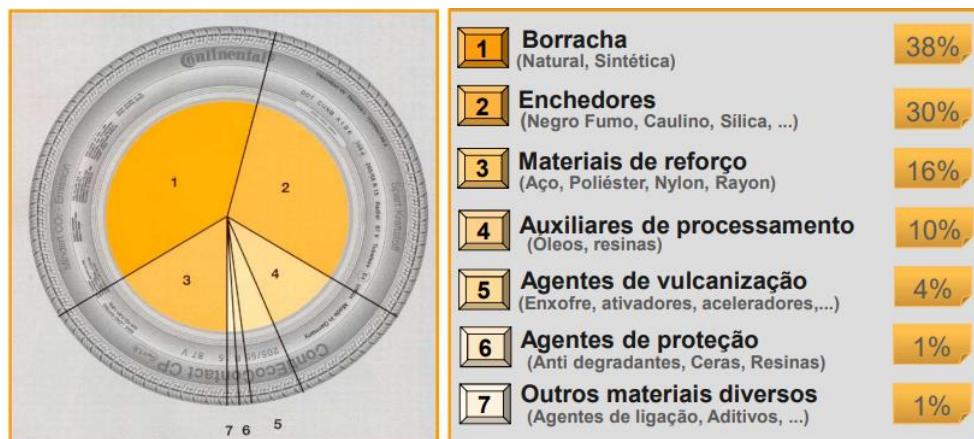
Tabela 2.1 – Estruturas constituintes de um pneu [14]

| Estrutura                 | Figura                                                                              | Material                                              | Função                                                                                                                 |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 - Núcleo do Talão       |    | Fios de aço revestidos de borracha                    | Manter o pneu firme na jante; Transmitir o binário do motor; Estanquicidade do pneu                                    |
| 2 - Cunha do Talão        |   | Borracha sintética                                    | Precisão da direção; Estabilidade direcional; Auxilia no rolamento                                                     |
| 3 - Revestimento interior |  | Borracha butílica                                     | Vedar o interior do pneu cheio com ar comprimido                                                                       |
| 4 - Carcaça têxtil        |  | Cordões de rayon ou poliéster numa matriz de borracha | Suportar a carga e velocidade com o auxílio do ar comprimido; Transmitir forças do pneu à roda                         |
| 5 - Reforço do Talão      |  | Cordões de rayon ou poliéster numa matriz de borracha | Precisão da direção; Capacidade de suportar velocidades elevadas                                                       |
| 6 - Rebordo               |  | Borracha sintética                                    | Garantir a estanquicidade do ar; Auxiliar o assento do pneu na jante; Resistir às forças de atrito do rebordo da jante |

| Estrutura          | Figura                                                                             | Material                                                                | Função                                                                                                                                           |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7 - Cinta metálica |   | Cordões de aço entrelaçados entre si numa matriz de borracha            | Conferir rigidez radial e transversal; Estabilizar a forma do pneu; Assegurar a estabilidade direcional                                          |
| 8 - Cinta têxtil   |   | Cordões de <i>nylon</i> ou combinação com aramida numa tira de borracha | Melhor a manobrabilidade; Manter a estabilidade dimensional a velocidades elevadas                                                               |
| 9 - Parede lateral |   | Borracha natural                                                        | Proteger a carcaça contra danos e condições temporais                                                                                            |
| 10 - Piso          |  | Borracha natural e/ou sintética                                         | Proteger contra o desgaste; Garantir resistência ao rolamento e aderência à estrada. O padrão condiciona a aquaplanagem, ruído e manobrabilidade |

Tendo em conta as diversas estruturas necessárias para a construção de um pneu, tal como se apresentam na **Tabela 2.1**, a sua composição variará conforme a sua especificidade e finalidade. Todavia, as matérias-primas empregues no seu fabrico encontrar-se-ão sempre inseridas no mesmo conjunto de ingredientes. Posto isto, na

**Figura 2.2** apresenta-se a composição média de cada uma das matérias-primas utilizadas, tendo como exemplo um pneu radial ligeiro [14].



**Figura 2.2** – Distribuição dos ingredientes num pneu radial ligeiro [14].

A análise detalhada das matérias-primas representadas na **Figura 2.2** encontra-se abordada no **Capítulo 3** onde se explica em detalhe o processo de misturação.

## 2.2 Processo de Fabrico do Pneu

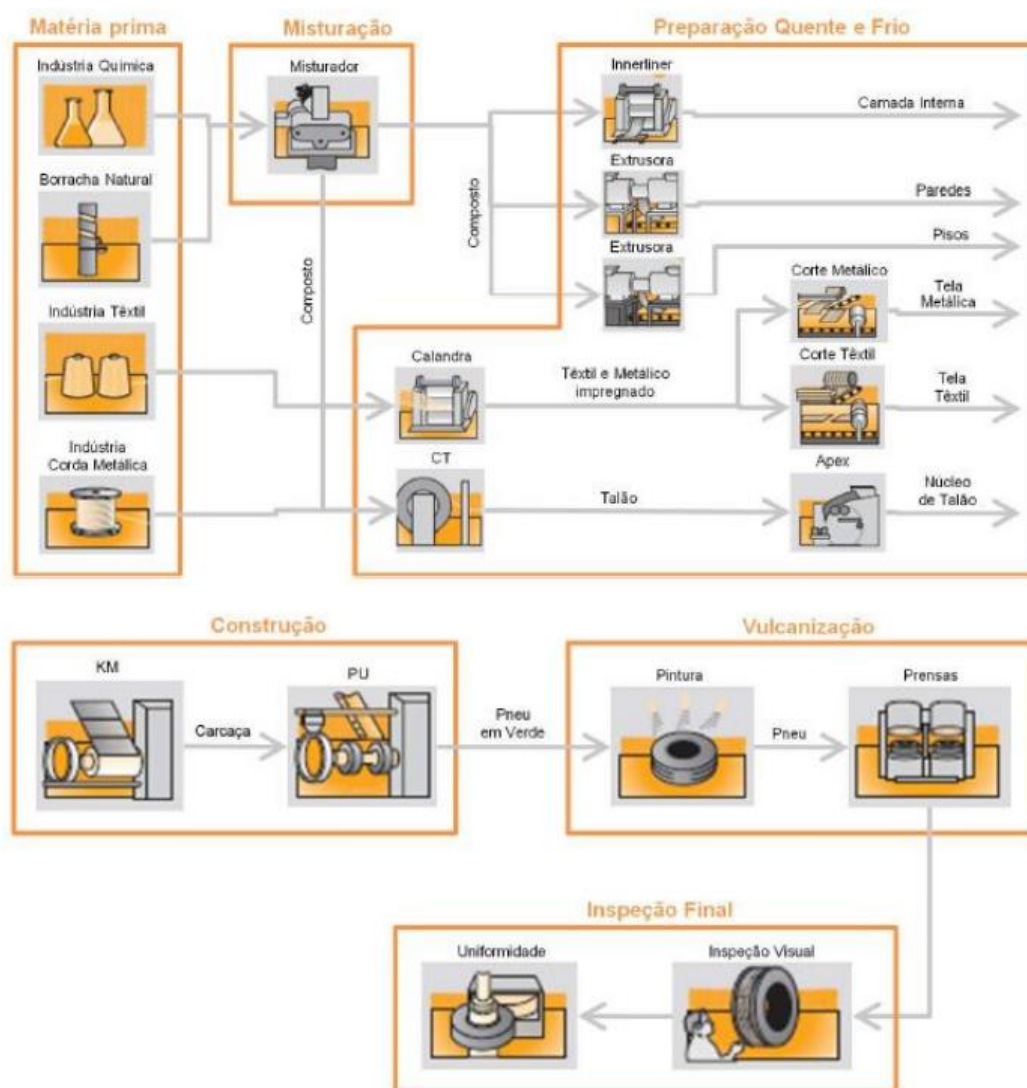
De uma forma genérica, os processos de produção de uma indústria transformadora compreendem três etapas distintas e sequenciais. A etapa inicial passa pela receção das matérias-primas necessárias ao processo de fabrico. Seguidamente dá-se a etapa da produção propriamente dita e, por fim, efetua-se o armazenamento e distribuição do produto acabado [15].

O processo de fabrico para a produção de pneus na Continental Mabor encontra-se fundamentalmente segmentado em cinco grandes fases: misturação, preparação, construção, vulcanização e inspeção final, que se encontram representadas na Figura 2.3 [16].

O processo produtivo inicia-se, tal como se pode verificar pela **Figura 2.3**, pela etapa da misturação onde são produzidos os diversos compostos de borracha que

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

transitam posteriormente para a etapa de preparação que compreende os processos de extrusão, calandragem e corte. Após a conclusão desta etapa realiza-se a fase da construção onde se realiza a montagem dos componentes em pneu. A etapa de vulcanização tem por objetivo atribuir ao pneu proveniente da construção (“pneu em cru” ou “pneu em verde”) a forma e relevo característicos de acordo com a sua utilização final. Por último, mas não menos importante, realiza-se a inspeção final onde se procede ao controlo da qualidade do produto obtido, garantindo-se assim que todos os requisitos são cumpridos [15].



**Figura 2.3** - Processo produtivo do pneu da Continental Mabor [15]

Com o objetivo de esclarecer melhor o processo produtivo representado na **Figura 2.3** descreve-se cada uma das etapas de uma forma mais pormenorizada nas **secções 2.2.1 a 2.2.5**.

### **2.2.1 Misturação**

O processo produtivo inicia-se com a misturação. Nesta etapa, tendo em conta a especificidade da receita para a produção de um composto de borracha, efetuam-se as pesagens (automática ou manual) e medições das matérias-primas, tais como, polímeros de borracha natural e/ou sintética, óleos e resinas, negro de fumo ou sílica, entre uma panóplia de outros. Estes ingredientes são então encaminhados para as misturadoras onde se efetua a sua aglomeração originando assim um composto de borracha homogéneo. De referir que tanto as matérias-primas como o composto de borracha resultante são sujeitos a um apertado controlo da qualidade, garantindo-se assim a melhor eficiência e qualidade dos processos a jusante e consequentemente do produto final [15].

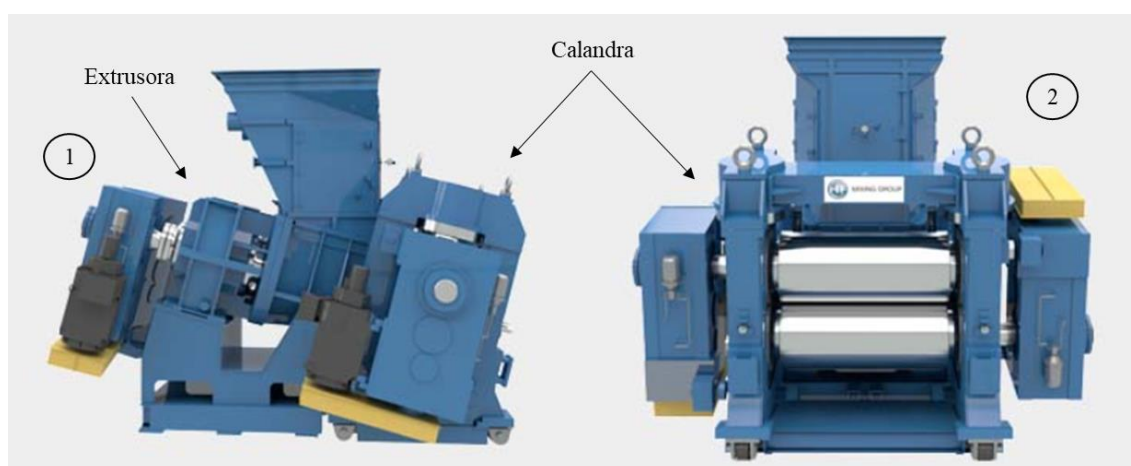
### **2.2.2 Preparação (Extrusão, Calandragem e Corte)**

A preparação tem como missão a montagem propriamente dita do pneu. Além dos compostos de borracha provenientes da misturação, ainda são necessários outro tipo de materiais, tais como, arame, tecido têxtil e tela metálica [15].

No processo de extrusão, os compostos de borracha que transitam da misturação são alimentados a uma extrusora. Este equipamento consiste num ou mais parafusos sem fim, que obrigam por efeito da pressão que os compostos passem através de uma ranhura e assim adquiram um certo perfil. Na etapa de extrusão formam-se perfis de borracha, paredes laterais e pisos [7, 17].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

A calandragem representa um processo onde o objetivo é a formação de filmes de um determinado material quando extrudido diretamente ao passar por entre dois rolos. No caso da Continental Mabor, a etapa da calandragem torna-se necessária não só para a formação de filmes de composto de borracha com dimensões características (largura e espessura), mas também para o revestimento dos tecidos têxteis e metálicos com borracha. Após a realização da calandragem promove-se o corte de ambos os tecidos, originando-se assim as telas têxteis, as cintas têxteis e metálicas bem como o reforço de talão [7, 17]. Na **Figura 2.4** encontra-se representada a vista lateral e frontal da extrusora e da calandra.



**Figura 2.4** - Vista lateral (1) e frontal (2) da extrusora e calandra. Adaptado de: [38]

### 2.2.3 Construção

As estruturas fabricadas na etapa da preparação são encaminhadas para o processo de construção onde se efetua a sua montagem, dando origem ao “pneu em cru” ou “pneu em verde”. Cada zona de construção possui 2 máquinas, *Karkasse Maschine* (KM) e *Production Unit* (PU). Na KM, constrói-se a carcaça do pneu sendo constituída pela camada interior, telas têxteis (primária e/ou secundária) e paredes de reforço. Seguidamente, a carcaça é transferida para a PU onde se adicionam as telas metálicas (“*breakers*”) e o piso [15, 16].

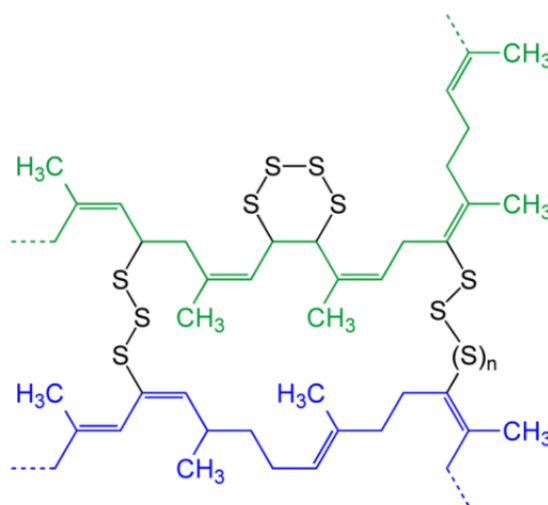
Tal como nas restantes etapas, a construção é igualmente sujeita a um rigoroso controlo da qualidade. No entanto, este controlo de qualidade será, porventura, um dos mais importantes, uma vez que, a partir do momento em que o “pneu em verde” sofre

vulcanização, não existe possibilidade de reciclar os componentes que não se encontrem dentro das especificações de qualidade pretendidas. Tal situação pode acarretar elevados custos para a empresa tendo ainda em consideração o problema da sustentabilidade. Assim, os componentes e estruturas que se desviem dos padrões de qualidade impostos são reciclados em outros processos a montante da etapa da construção, como por exemplo, na misturação (comumente designados por “*workoff*”) ou até poderão ser utilizados para outras aplicações [7, 15, 16].

#### 2.2.4 Vulcanização

O processo de vulcanização é antecedido pela etapa da pintura onde se revestem os “pneus em verde” com lubrificantes permitindo reduzir o atrito entre estes e as prensas de vulcanização, aumentando assim a longevidade dos diafragmas (componentes das prensas de vulcanização) e também facilitando o desmolde dos pneus [15].

A vulcanização consiste na alteração da estrutura química da borracha, através da ação da temperatura e pressão por um determinado período de tempo, onde ocorre a interligação das cadeias poliméricas independentes em vários pontos, dando origem a uma rede tridimensional [18]. As interligações estabelecidas designam-se por reticulações. As reações de reticulação são efetuadas, geralmente, por agentes de vulcanização (enxofre, óxidos metálicos e peróxidos orgânicos) com o auxílio de ativadores, retardadores e aceleradores, providenciando-se assim as características pretendidas de vulcanização e consequentemente do produto vulcanizado [18]. A **Figura 2.5** ilustra o processo de vulcanização promovida pelo enxofre [17].



**Figura 2.5** – Reticulações entre cadeias poliméricas através de moléculas de enxofre [17].

O controlo das variáveis processuais que condicionam a vulcanização (temperatura, pressão e tempo) garantem não só que o “pneu em cru” adquira uma forma e relevo específicos de acordo com a sua aplicação final, mas também que aumente a sua resistência mecânica e térmica e a sua dureza. Analisando em detalhe cada uma das variáveis mencionadas, pode-se afirmar que a temperatura influencia mais fortemente as propriedades mecânicas do pneu obtido; a pressão intervém diretamente no processo de moldagem evitando, igualmente, que certos compostos intervenientes nas reações de reticulação vaporizem devido à aplicação de calor; o tempo ajusta-se devido principalmente ao tipo e tamanho do composto de borracha utilizado no fabrico do pneu [16].

### 2.2.5 Inspeção Final

A última etapa diz respeito à inspeção final onde se avaliam se os requisitos da qualidade, construção e segurança se encontram dentro dos parâmetros especificados, recorrendo-se a verificações visuais, manuais e automáticas. Após esta fase, o pneu é transferido para o armazém do produto acabado onde estará pronto a ser expedido para o cliente [7, 15].

### 3. Estado da arte: Misturação

Neste capítulo procede-se à descrição pormenorizada do processo de misturação de compostos de borracha, onde se abordam as diferentes matérias-primas intervenientes no processo, o tipo de equipamentos utilizados assim como a sequência de etapas até à obtenção do composto final. Analisa-se igualmente as Unidades de Controlo de Temperatura e o sistema de transporte das matérias-primas, com especial enfoque no transporte de negro de fumo.

#### 3.1 Fundamentos da mistura de compostos de borracha

Misturação pode ser definida como uma operação que reduz o grau de heterogeneidade de um sistema, composto por dois ou mais componentes mutuamente inertes. Este processo é levado a cabo por equipamentos denominados misturadores onde se promove o rearranjo dos componentes presentes no sistema para um estado em que, idealmente, estes se encontrem uniformemente distribuídos e dispersados [19].

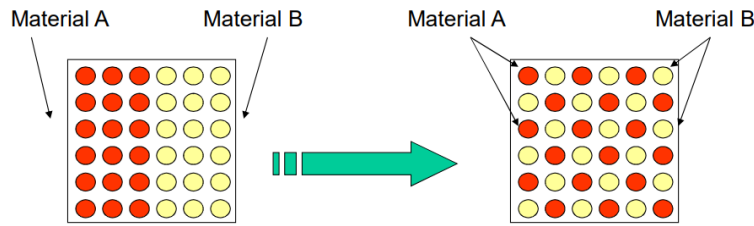
O processo de mistura de compostos de borracha constitui uma tarefa complexa e sofisticada, uma vez que os componentes necessários para o efeito apresentam formas e configurações muito heterogéneas entre si quando alimentados ao misturador. Assim sendo, a conversão das matérias-primas num produto homogéneo é acompanhada por um elevado custo capital [20].

De forma a garantir o sucesso do processamento de compostos de borracha, diferentes mecanismos de mistura são aplicados, tais como [20]:

- **Mistura distributiva** - As partículas do sistema alteram a sua posição de modo a atingir-se uma distribuição uniforme na mistura. As forças motrizes que induzem a mudança de posições das partículas são as rotações do material dentro da câmara de misturação, a intensidade de transporte de massa do material no misturador e o número total de rotações da mistura. O tamanho

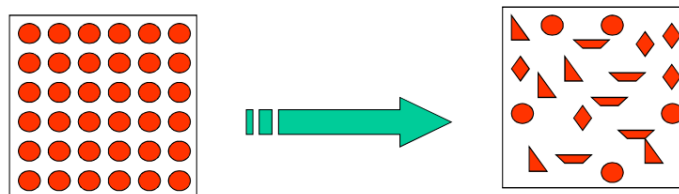
## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

das partículas permanece inalterado durante a ocorrência deste fenómeno (**Figura 3.1**) [20].



**Figura 3.1** - Mistura distributiva [39]

- **Mistura dispersiva** - Contrariamente à mistura distributiva, na mistura dispersiva ocorre a redução do tamanho das partículas dentro do misturador. Esta redução é conseguida através da aplicação de forças de tensão e de cisalhamento. As forças motrizes responsáveis por este tipo de mistura são a aplicação das forças mencionadas e o tempo no qual foram aplicadas, sendo possível caracterizá-las pelo momento torcional aplicado, ou através da potência do misturador (**Figura 3.2**) [20].



**Figura 3.2** - Mistura dispersiva [39]

- **Mistura laminar** – Este tipo de mistura provoca o aumento da área interfacial do composto de borracha através da aplicação repetitiva de forças de tensão ou cisalhamento. Este mecanismo de mistura ocorre sobretudo pela passagem do composto entre os rotores do misturador e também através da folga existente entre o rotor e a parede do misturador (**Figura 3.3**) [20].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

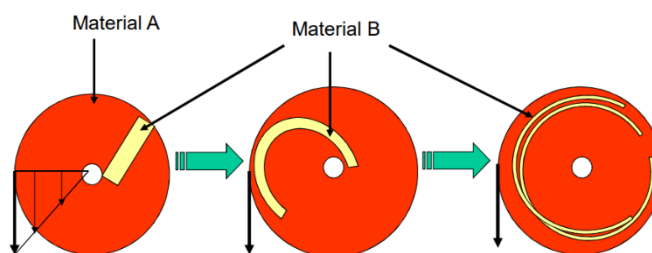
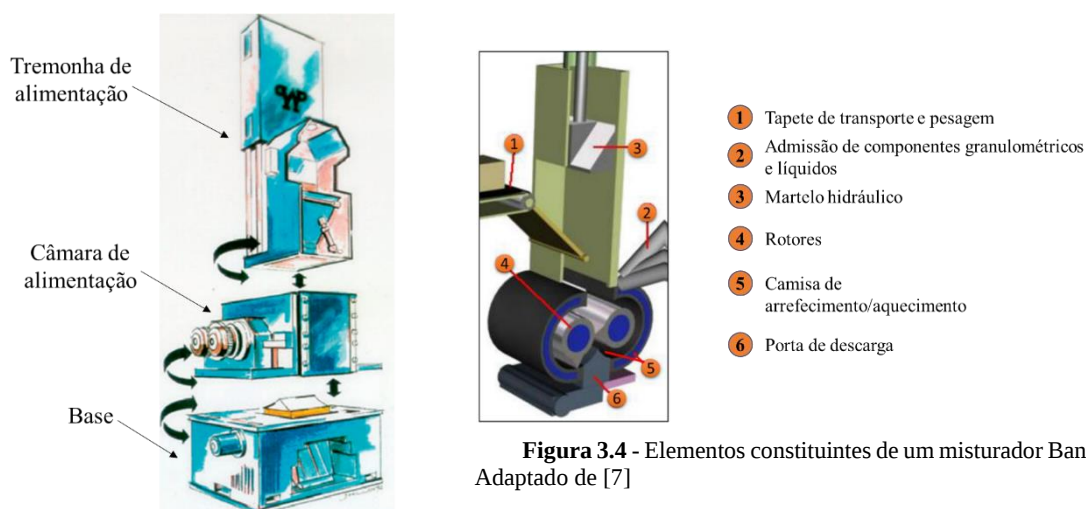


Figura 3.3 - Mistura laminar [39]

### 3.1.1 Misturadores

Os misturadores são equipamentos que operam em modo *batch* onde se realiza o processo de misturação das matérias-primas transformando-as em compostos de borracha. A capacidade de produção de uma linha de misturação assim como a qualidade dos compostos produzidos são determinados pela dimensão do misturador e pela sua eficiência de misturação. Este tipo de máquina apresenta uma construção modular, sendo constituída por três grandes subunidades: a tremonha de alimentação (1), a câmara de misturação (2) e a base (3), como é possível observar na **Figura 3.4**. Na **Figura 3.5** encontram-se representados os elementos que fazem parte de cada uma das subunidades apresentadas na **Figura 3.4** [16, 20].



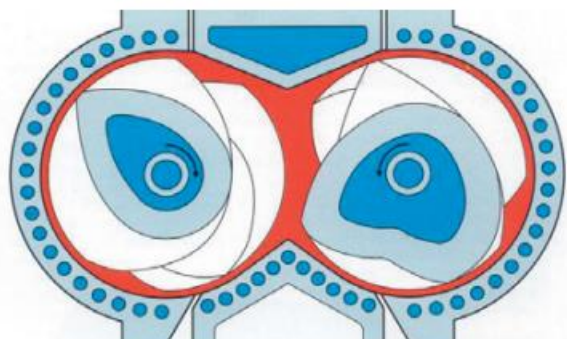
**Figura 3.4** - Elementos constituintes de um misturador Banbury.  
Adaptado de [7]

**Figura 3.5** - Subunidades de um misturador Banbury [20]

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

A parte superior do misturador é constituída pela tremonha de alimentação por onde as matérias-primas são alimentadas ao misturador. No interior desta estrutura encontra-se um martelo pneumático, que impele os componentes contra os rotores do misturador facilitando assim o seu processo de mistura. Na câmara de misturação é onde se realiza a misturação propriamente dita das matérias-primas em compostos de borracha através da ação de dois rotores, em que um deles roda no sentido horário e o outro no sentido anti-horário. O sucesso e eficiência da etapa de misturação no processo de fabrico do pneu encontra-se diretamente ligada à eficiência dos rotores implementados, podendo estes serem essencialmente dois tipos [16, 20]:

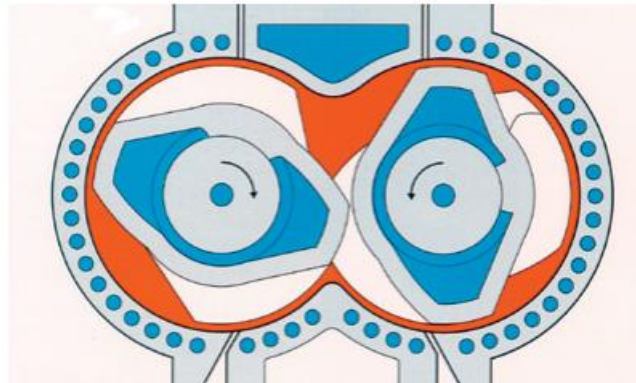
- **Rotores tangenciais** - O movimento das asas deste tipo de rotores não permite que estes se toquem, existindo assim uma folga entre ambos. Esta configuração permite que os rotores possam ser controlados de forma independente, podendo rodar a velocidades distintas, onde a ação de mistura ocorre predominantemente entre os rotores e as paredes internas da câmara de misturação. Tipicamente, um rotor roda, aproximadamente, com um incremento de 10% em relação à velocidade do outro rotor. Rotores do tipo tangencial requerem, por norma, uma potência de 7 kW por litro de volume útil, no entanto, este valor pode variar conforme, por exemplo, as características dos componentes a misturar. Os volumes úteis deste tipo de rotores encontram-se numa gama compreendida entre 1 L e 650 L (**Figura 3.6**) [20].



**Figura 3.6** - Vista em corte de rotores tangenciais [20]

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

- **Rotores *Intermeshing*** – Por contraste aos rotores tangenciais, os movimentos das asas dos rotores *intermeshing* provocam a colisão de um com o outro. Desta forma ambos os rotores estão permanentemente fixos relativamente ao seu raio, rodando à mesma velocidade. Devido às características mencionadas, a ação de mistura ocorre assim entre ambos os rotores, como também entre as paredes internas da câmara de misturação (**Figura 3.7**).



**Figura 3.7** - Vista em corte de rotores *intermeshing* [20]

Efetuando-se a comparação entre os dois tipos de rotores apresentados, verifica-se que os rotores *intermeshing* possuem maior eficiência que os rotores tangenciais. De facto, o sistema *intermeshing* possui um espaço inferior entre rotores o que permite que a eficiência da misturação seja superior, através de uma ação mais vigorosa de mistura; o volume da câmara de misturação é mais reduzido, no entanto, a área superficial entre o rotor e o composto é superior, o que resulta numa taxa de arrefecimento superior. Consequentemente, consegue-se controlar de uma forma mais eficiente a temperatura dos compostos dentro da câmara de misturação. Como desvantagens, realçam-se a maior dificuldade de admissão das matérias-primas ao misturador, devido à menor folga entre rotores, assim como um maior consumo de energia. Todavia, como a qualidade do composto obtido é superior quando se utilizam os rotores *intermeshing* este é o tipo de rotor mais empregue na indústria [20].

A base do misturador encontra-se situada debaixo da câmara de misturação, contendo uma porta de descarga que esvazia o composto após o término do processo [20].

### 3.1.2 Matérias-primas

Os compostos de borracha fabricados na etapa de misturação contêm na sua composição uma série de ingredientes com funções distintas de acordo com os objetivos do pneu a produzir. Posto isto, as matérias-primas que intervêm na formação dos compostos de borracha podem ser [16]:

- **Borracha:** Polímero natural ou sintético – São os componentes de base dos compostos de borracha, consistindo em cadeias de polímero longo, sendo flexíveis à temperatura de serviço. Como exemplo de polímeros sintéticos destacam-se a borracha SBR (estireno e butadieno), BR (polibutadieno), IIR (butadieno e isopreno). A borracha natural é constituída por IR (Isopreno). Têm como principais funções aumentar a elasticidade, durabilidade, estanquicidade e amortecimento (absorção de energia) do pneu (**Figuras 3.8, 3.9 e 3.10**) [21].



**Figura 3.10** - Borracha Natural [21]

**Figura 3.9** - Borracha polibutadieno [21]

**Figura 3.8** - Borracha SBR [21]

- **Enchedores:** Encontram-se basicamente divididos em duas classes: reforço e não reforço. Os principais enchedores de reforço utilizados pela indústria são o negro de fumo (**Figura 3.11**) e a sílica precipitada (**Figura 3.12**). Enchedores de não reforço contemplam normalmente o caulino e o carbonato de cálcio. As principais finalidades dos enchedores de reforço nos compostos de borracha não vulcanizado são a redução da viscosidade do polímero durante a mistura; o melhoramento da performance do composto na etapa de preparação; a manutenção da forma do material. Para o composto vulcanizado

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

permitem o aumento da resistência à fadiga, à fratura, ao desgaste, à abrasão e ao rasgo; fornecem rigidez ao pneu; restringem o deslocamento dos componentes do pneu. As funções dos enchedores de não reforço passam por melhorar a estanquidade ao ar, melhorar características de mistura e reduzir o custo do material (**Figura 3.11 e 3.12**) [21].



**Figura 3.12** - Negro de fumo [21]



**Figura 3.11** - Sílica precipitada [39]

- **Auxiliares de processamento:** Óleos, ácidos gordos, promotores de adesividade e plastificantes - Os óleos melhoram o nível de dispersão da carga durante a mistura e evitam acumulação de energia calorífica na mistura; os ácidos gordos evitam a aderência da borracha às estruturas metálicas e reduzem a viscosidade do composto melhorando o seu processamento; os promotores de adesividade permitem controlar a aderência da borracha processada; os plastificantes promovem a quebra das ligações do polímero reduzindo assim a sua viscosidade [21].
- **Agentes de vulcanização:** Ativador (silano), promotor da vulcanização (enxofre), aceleradores e retardadores – Os ativadores formam complexos com os aceleradores melhorando a sua ação; os promotores da reação de vulcanização promovem a criação de reticulações nas cadeias do polímero; os aceleradores aumentam a velocidade e ao mesmo tempo controlar as reações de reticulação; os retardadores servem para retardar a velocidade de reação de reticulação [21].

- **Agentes de proteção:** Antioxidantes, antiozonantes e ceras – Fornecem proteção química ou criam uma barreira contra o ataque químico da borracha por agentes externos ou pelo meio ambiente. Os antioxidantes protegem contra o envelhecimento devido a fenómenos oxidativos; os antiozonantes protegem contra o ataque do ozono; as ceras fornecem proteção estática [21].

### 3.2 Fases do processo de mistura

A complexidade da produção de um composto de borracha pressupõe a necessidade de controlar um conjunto considerável de variáveis por forma a garantir a qualidade do produto obtido de acordo com a especificação da receita de mistura. Os parâmetros mais importantes que necessitam de monitorização são, entre outros, os seguintes [16, 20]:

- Fator de enchimento – Razão entre o volume da carga e volume do misturador;
- Velocidade de rotação dos rotores;
- Pressão do martelo pneumático;
- Tempo total de mistura;
- Consumo de energia;
- Temperatura de mistura;
- Temperatura da água de arrefecimento;
- Torque dos rotores.

O sistema que monitoriza estes parâmetros designa-se por *Mixing Management System* (MMS).

O processo de misturação está genericamente dividido em 5 fases sequenciais. Estas 5 fases podem ser acompanhadas pela variação da temperatura do composto e do torque aplicado pelos rotores em função do tempo de mistura, como se demonstra na **Figura 3.13** [16].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

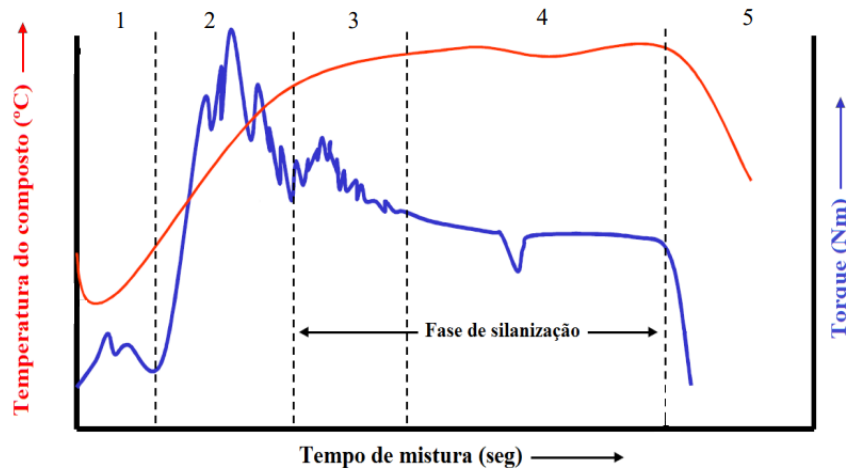


Figura 3. 13 - Variação da temperatura e do torque ao longo do tempo do processo de mistura [39]

As 5 fases evidenciadas pela Figura 3.13 correspondem [16]:

- **Fase 1:** Início do processo de mistura. Carregamento dos polímeros e enchedores no misturador;
- **Fase 2:** Aumento vertiginoso do torque devido à descida do martelo pneumático. A descida do martelo pneumático provoca a compressão da carga dentro da câmara de mistura, gerando elevadas forças de tensão e cisalhamento no composto, induzindo um aumento da sua temperatura. Nesta etapa ocorre a finalização da incorporação dos enchedores nos polímeros de borracha.
- **Fase 3:** Carregamento dos óleos e início da etapa de silanização. A incorporação dos óleos permite a redução da viscosidade do composto, facilitando assim a sua dispersão.
- **Fase 4:** Término da dispersão e silanização do composto. Esta fase é designada de “Plateau”, uma vez que ocorre a estabilização do torque permitindo assim que a temperatura do composto se mantenha constante por forma a controlar a reação de silanização. Denota-se uma variação praticamente instantânea do torque devido à descida e consequente subida do martelo pneumático.
- **Fase 5:** Saída do composto pela porta de descarga.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

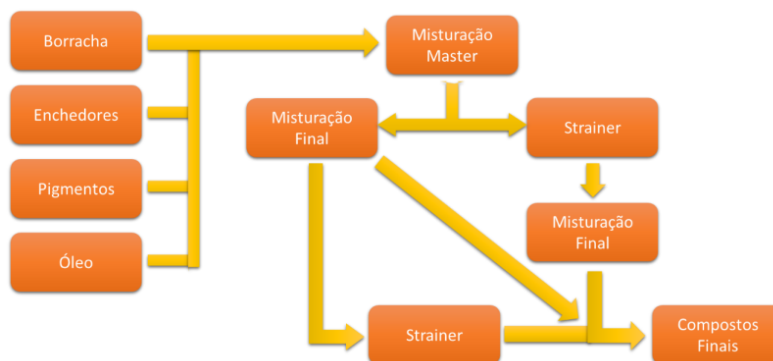
A silanização é um tipo de reação em que intervêm os enchedores de sílica precipitada e os compostos de borracha com o objetivo de providenciar elevados níveis de resistência ao desgaste e de tração em pavimento molhado, algo que não é possível recorrendo-se apenas ao negro de fumo [20].

Devido à superfície polar da sílica precipitada, existe uma interação forte sílica-sílica via pontes de hidrogénio. Este fenómeno provoca a formação de uma rede de sílica por aglomeração devido à hidrofobicidade da sua superfície, impedindo assim a ligação desta ao composto [20].

De modo a garantir o estabelecimento da ligação sílica-composto, incorporam-se silanos bifuncionais na estrutura da sílica precipitada, sendo estes constituídos por dois grupos reativos. O grupo que reage com a sílica exerce uma proteção escudo aos grupos OH<sup>-</sup> da sua estrutura, diminuindo assim o carácter polar da superfície inibindo o fenómeno de aglomeração. O grupo ativo reage com o polímero durante a etapa de vulcanização, desenvolvendo ligações covalentes entre os enchedores e o composto [20].

### 3.3 Etapas do processo de misturação

O início do processo de misturação passa pela definição da receita de fabrico para a produção de um determinado composto. Após esta fase, a produção efetiva de um determinado composto de borracha segue 4 etapas distintas: Transporte e doseamento das matérias-primas, Misturação *Master*, Misturação Final e/ou *Strainer*. Na **Figura 3.14** encontra-se representado o fluxograma das etapas mencionadas no processo de misturação [7].



**Figura 3.14** - Fluxograma das etapas no processo de misturação [7]

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

No processo de misturação moderno, a primeira etapa diz respeito aos sistemas destinados ao transporte e doseamento das diversas matérias-primas necessárias à produção dos compostos de borracha. Estes sistemas necessitam de uma operação manual muito reduzida encontrando-se a funcionar de uma forma praticamente automática, o que permite que os diversos tipos de matérias-primas possam ser incorporadas a qualquer momento e em quantidades variadas no processo de uma forma fiável, rápida e com um elevado grau de precisão. Permitem igualmente garantir a segurança operacional desta etapa devido a serem construídos como sistemas fechados onde se elimine a contaminação e as perdas das matérias-primas desde a sua chegada à fábrica até à câmara de misturação [22]. Dentro destas sistemas evidenciam-se os seguintes:

- **Sistemas de passadeiras rolantes para a admissão ao misturador de borracha e pigmentos (Figura 3.15).**



**Figura 3.15 - Passadeira rolante**

- **Sistemas de doseamento de compostos químicos, como por exemplo, pigmentos (Figura 3.16).**

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação



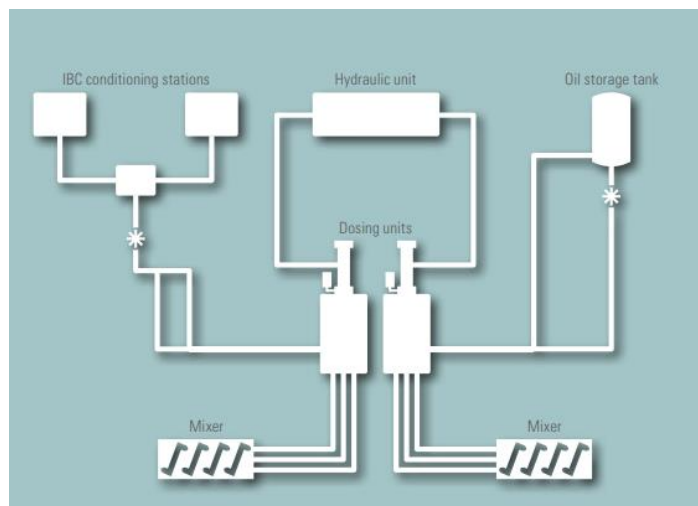
**Figura 3.16** - Sistema de doseamento automático de pigmentos

- **Doseamento volumétrico em cilindros de elevada precisão de silanos e óleos provenientes de IBC's (Intermediate Bulk Containers).** Os IBC's providenciam igualmente o aquecimento prévio destes componentes com recurso a resistências elétricas até à temperatura estabelecida pela receita. O transporte dos óleos e silanos desde os IBC's até aos cilindricos volumétricos é conseguida através de tubagens que circundam em volta da fábrica (**Figuras 3.17 e 3.18**) [22]



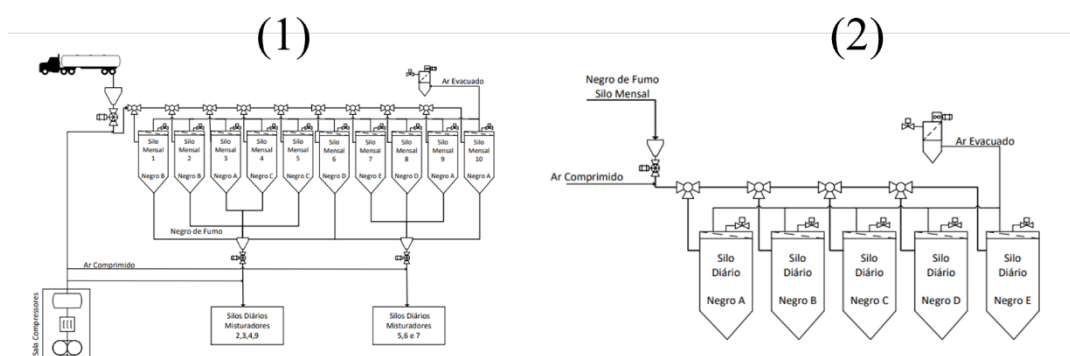
**Figura 3.17** - Cilindro volumétrico de doseamento de óleos e silanos

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação



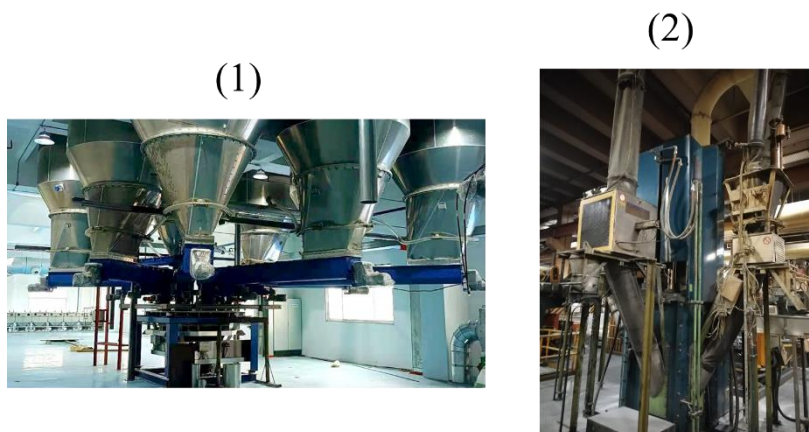
**Figura 3.18** - Diagrama exemplificativo do sistema de transporte e doseamento de óleos e silanos [22]

- Sistemas pneumáticos de transporte de negro de fumo/sílica desde a sua chegada à fábrica até aos silos de armazenamento mensal e diário.** Inicialmente o negro de fumo chega à fábrica via camiões cisterna. O negro de fumo é arrastado por tubagens com recurso a ar comprimido para cada um dos silos mensais. De referir que existem diversas variedades de negro de fumo, pelo que, existe um ou vários silos mensais destinados para cada tipo de modo a evitar contaminação cruzada. O transporte desde os silos mensais até aos silos diários segue o mesmo princípio de funcionamento. Uma vez mais, pela razão anteriormente descrita existem diversos silos diários alocados a cada um dos misturadores uma vez que o mesmo misturador pode efetuar receitas diferentes - **Figura 3.19**. A partir dos silos diários o negro de fumo é doseado e transportado pelo sistema automático representado na **Figura 3.20**.



**Figura 3.19** - (1) Transporte de negro de fumo desde o camião cisterna até aos silos mensais;

(2) Transporte de negro de fumo desde os silos mensais até aos silos diários [7]



**Figura 3.20** - Sistema de doseamento e transporte de negro de fumo:

(1) Doseamento [22];

(2) Transporte até à câmara de misturação

A etapa referente à Misturação *Master* tem como objetivo a produção de compostos intermédios, i.e, compostos que ainda não possuem todos os constituintes necessários definidos pela receita de modo a prosseguir para as etapas a jusante da construção do pneu. É durante esta etapa que existe a dispersão e homogeneização dos enchedores e agentes de processamento na borracha na câmara de misturação através da aplicação de elevadas forças de tensão e cisalhamento com o consequente aumento da temperatura do composto [7].

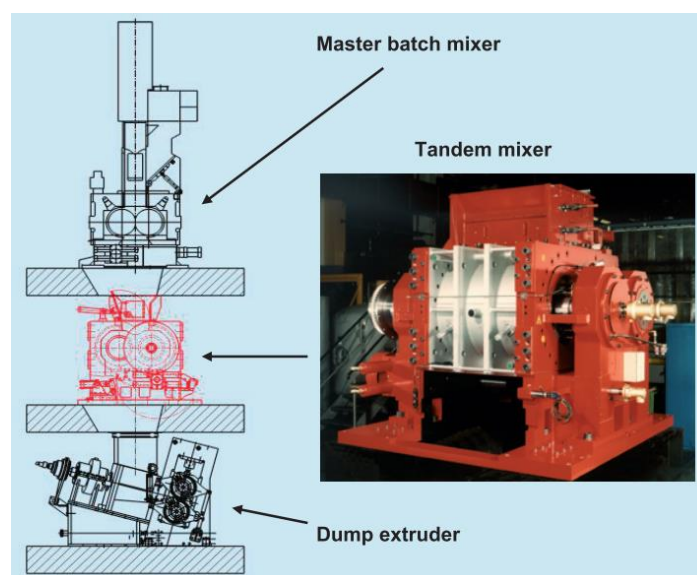
A etapa da Misturação Final ocorre após a etapa da Misturação *Master*, representando a finalização do processo de misturação propriamente dito. Ocorre a distribuição dos agentes vulcanizantes no composto *master* com recurso a forças de tensão e cisalhamento inferiores relativamente à Misturação *Master*. Este efeito é realizado de forma propositada, uma vez que a aplicação menos intensa das forças mencionadas permite que o composto não atinja uma temperatura tão elevada, evitando-se desta forma a vulcanização durante a misturação [7, 16].

Dependendo das condições em que se encontram os compostos *master* e finais, pode ser necessário efetuar a etapa *Strainer* de modo a garantir-se as especificações definidas para estes, não comprometendo assim as etapas posteriores do processo de fabrico do pneu. Nesta etapa procura-se filtrar corpos estranhos que possam estar associados ao composto como também reduzir a sua viscosidade.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Como resultado de ineficiências associadas ao processo de misturação e preparação existe a geração de *Rework* - *RW* (material constituído pelo próprio composto vindo da etapa da preparação), *Work-off* - *WO* (material constituído por mais que um composto vindo das etapas de preparação e/ou construção) e *scrap*. O *RW* e *WO* não são tratados como resíduos, uma vez que são reciclados na receita de fabrico dos compostos finais tanto em bruto como em pasta. O *scrap* é tratado como resíduo pelo facto de não possuir os padrões de qualidade que permitam a sua reciclagem.

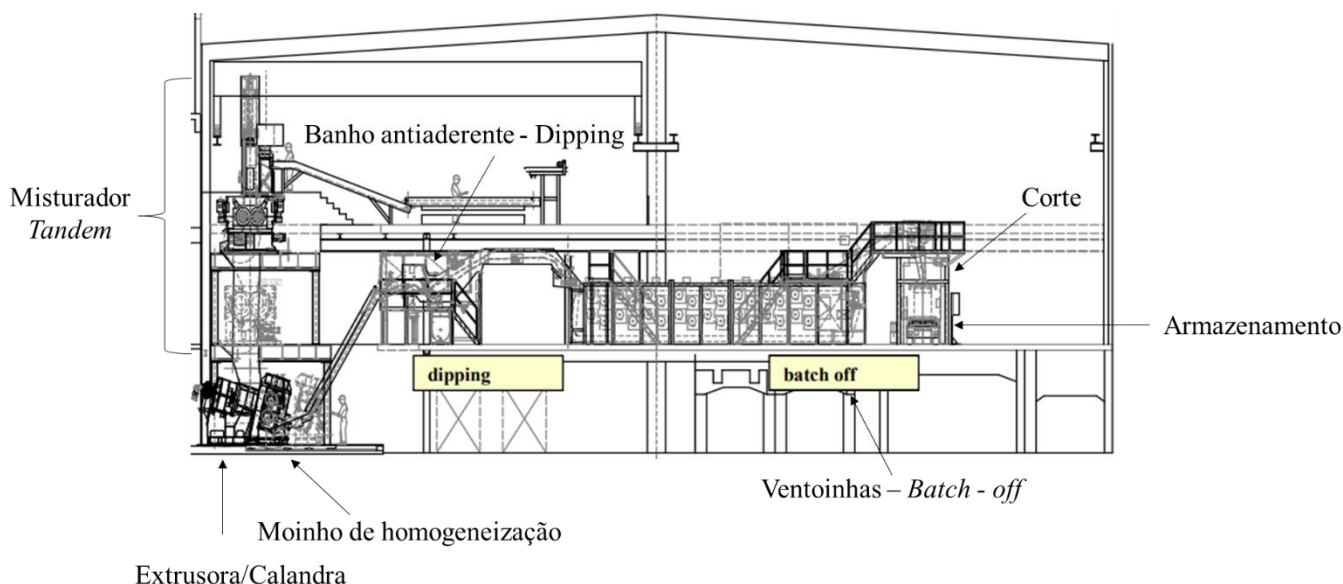
As etapas de Misturação *Master* e Final podem ser efetuadas em misturadores *Single* ou em misturadores *Tandem*. O misturador do tipo *Single* apenas possui uma câmara de misturação, pelo que apenas pode realizar uma etapa de cada vez, enquanto o misturador *Tandem* possui duas câmaras de mistura podendo realizar a Misturação *Master* e Final de forma contínua e consecutiva. A introdução da tecnologia *Tandem* trouxe um conjunto de vantagens para a indústria de produção de pneus, nomeadamente um aumento da capacidade de produção pelo facto de não existir o armazenamento temporário do composto master, assim como um melhor efeito de dispersão dos agentes vulcanização e homogeneização do composto, uma vez a câmara de mistura inferior tem um volume superior não possuindo martelo pneumático. Permite igualmente um melhor controlo da temperatura da câmara pelo facto de existir uma maior área de arrefecimento para o composto. A câmara superior é idêntica à câmara de mistura de um misturador *Single*. Na **Figura 3.21** representa-se a configuração de um misturador *Tandem* [16, 20].



**Figura 3.21** - Misturador Tandem [20].

### 3.4 Linhas de Misturação

Finalizado o processo de misturação, o composto é encaminhado para uma determinada linha de misturação onde se sucedem outros processos até ao seu armazenamento. Os compostos obtidos da Misturação *Master* são encaminhados para uma extrusora situada imediatamente em baixo da porta de descarga do misturador e de seguida passam por uma calandra. Daqui resulta um filme do composto com largura e espessura desejada. De seguida, o filme é encaminhado para um moinho de homogeneização, sendo posteriormente imerso num tanque contendo um banho antiaderente (solução de sabão) que além de baixar a sua temperatura, cria uma camada externa na superfície que previne a adesão a outros filmes quando se procede ao armazenamento. Após a etapa anterior, procede-se à finalização do arrefecimento e da secagem dos compostos através de ventoinhas, processo denominado por *batch-off*. Por fim, realiza-se o corte dos filmes em dimensões apropriadas sendo dobrados e empilhados sobre paletes de modo a proceder ao seu armazenamento. Na **Figura 3.22** apresenta-se a sequência dos processos anteriormente descritos [7, 16].



**Figura 3.22** - Linha de misturação. Adaptado de: [19]

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

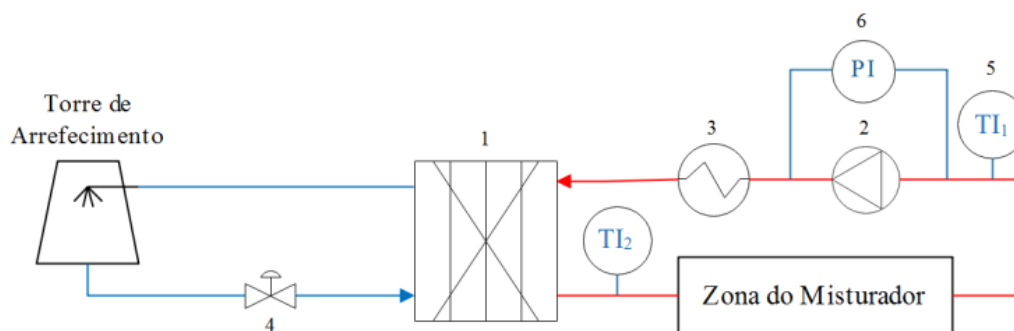
O processamento dos compostos finais é em tudo idêntico aos compostos *master*, diferindo apenas nas condições operatórias de misturação, tal como se referiu na secção 3.3, como também na inexistência de uma etapa de extrusão/calandragem, existindo somente a presença de dois moinhos de homogeneização.

Atualmente, na Continental Mabor existem 12 linhas de mistura, sendo enumeradas de #0 a #12. As linhas #0 até #7 possuem misturadores *Single*, enquanto que as linhas #9 até à #12 têm misturadores *Tandem*. Mais concretamente as linhas #0, #1 e #3 produzem compostos finais e as linhas #2 até #7 realizam a produção de compostos *master*, sendo que a linha #4 pode efetuar finais em caso de contingência. As linhas #9 e #10 produzem compostos *master*, finais ou os dois simultaneamente, sendo este tipo de produção denominado por OSM (One Step Mixing). As linhas #11 e #12 realizam apenas compostos masters ou produção OSM.

Associadas a cada linha de misturação encontram-se ainda unidades de controlo de temperatura e sistemas de aspiração de negro de fumo/sílica.

Uma unidade de controlo de temperatura, comumente conhecida como TCU (*Temperature Control Unit*), permite efetuar o controlo de temperatura do composto de borracha durante o processo de mistura propriamente dito e igualmente durante a extrusão/calandragem a jusante da câmara de misturação. Devido à elevada especificidade da receita de mistura, a temperatura do composto de borracha tem de se encontrar numa gama de valores bem definidos por forma a garantir que este se encontre com os padrões de qualidade estabelecidos, não comprometendo as etapas posteriores de fabrico do pneu. Para as linhas de misturação *Single* existem 2 TCU's, sendo uma destinada à câmara de misturação e outra à extrusora/calandra. Cada TCU da câmara de misturação possui 3 zonas de controlo de temperatura sendo distribuídas pelo corpo do misturador, rotor e porta de descarga/martelo hidráulico. Na TCU da extrusora /calandra existem 4 zonas de controlo: parafuso sem-fim, corpo, rolo superior e rolo inferior [16]. Para as linhas *Tandem* existe a presença de mais uma TCU, face às duas presentes na linha de misturação *Single*, devido à existência de uma câmara de misturação extra, sendo que neste caso as zonas de controlo de temperatura encontram-se distribuídas pelo corpo do misturador, rotores e porta de descarga. De maneira a ilustrar o princípio de funcionamento de uma zona afeta a uma determinada TCU, considere-se o diagrama P&I representado na **Figura 3.23**.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Figura 3.23** - Diagrama P&I de uma zona do misturador de uma TCU [16].

Observando a **Figura 3.23** verifica-se que cada zona de uma determinada TCU é constituída por dois circuitos de água fechados. O circuito que provém de um componente do misturador ou extrusora/calandra é designado como circuito de recirculação e o que provém da torre de refrigeração corresponde ao circuito de arrefecimento. Cada TCU encontra-se preparada para responder a situações onde seja necessário tanto o aquecimento ou arrefecimento da corrente de recirculação [7].

No primeiro caso, se o valor da temperatura da corrente de recirculação proveniente de um determinado componente for inferior à temperatura de *set-point* inserida o controlador PLC (Controlador Lógico Programável), este aciona a resistência elétrica e concomitantemente fecha a válvula de controlo de admissão de água de arrefecimento, o que provoca o aumento da temperatura da corrente de recirculação, passando pelo permutador de placas sem trocar calor com a corrente de arrefecimento [7].

Todavia, se a situação contrária se verificar, i.e, se a temperatura da corrente de recirculação for superior ao valor de da temperatura de *set-point*, o controlador PLC aciona apenas a válvula de controlo, permitindo que a corrente de água de arrefecimento entre no permutador de placas o que provoca a diminuição da temperatura da corrente de recirculação [7].

De facto, esta última situação ocorre com muito mais frequência, uma vez que a aplicação de elevadas tensões de compressão e cisalhamento, pelos rotores no composto de borracha, provoca uma elevada libertação de energia térmica, levando a um aumento vertiginoso da temperatura do composto, inviabilizando assim o processo de mistura [16].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Os sistemas de aspiração de negro de fumo/sílica encontram-se acoplados às câmaras de mistura permitindo recuperar a parte destes componentes que se liberta quando se se procede à abertura da porta de descarga. Os equipamentos responsáveis por esta ação são denominados por coletores de aspiração (**Figura 3.24**), sendo que posteriormente tanto o negro de fumo como a sílica são depositados em sacos de elevada capacidade (“*Big Bags*”) permitindo assim a sua reutilização em posteriores receitas de fabrico. De modo a que o ar utilizado nos sistemas de aspiração possa ser descartado de forma segura, existe acoplado ao coletor um filtro de mangas que retém as partículas de negro de fumo/sílica [7].



**Figura 3.24** - Coletor de aspiração e filtro de mangas (estrutura de cor verde) [7].



## 4. Gestão da Energia e Auditoria Energética

Neste capítulo pretende-se salientar a importância da gestão energética para a sustentabilidade de uma empresa e a forma adequada de a realizar.

### 4.1 Gestão da Energia

Hoje mais do que em qualquer outro momento da história da humanidade a gestão dos recursos energéticos assumiu uma preponderância estratosférica para a vida quotidiana da indústria transformadora. A crescente monopolização dos mercados energéticos e a instabilidade geopolítica provocou o aumento dos custos associados, como também, graves alterações ambientais, que levaram a implementar legislação cada vez mais restritiva no que concerne à quantidade de emissões de GEE (Gases de Efeito de Estufa).

Posto isto, a implementação de sistemas de gestão de energia a nível industrial deve ter como metas uma ótima utilização da energia em todos os setores da organização; minimização dos custos e desperdícios energéticos sem, contudo, afetar a qualidade da produção; minimizar o impacto ambiental [23].

Em Portugal, o Decreto-Lei 71/2008 de 15 de abril veio instaurar o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) com o “objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações Consumidoras Intensivas de Energia (CIE)”. O sistema mencionado regula que as instalações que possuam um consumo de energia igual ou superior a 500 tep/ano, são obrigados por lei à realização de uma auditoria energética com uma periodicidade de 8 anos, e, as instalações que apresentem consumos iguais ou superiores a 1000 tep/ano à realização de uma auditoria energética de seis em seis anos [23].

## 4.2 Auditoria Energética

O levantamento energético de uma instalação é ponto de partida para avaliar as condições de utilização e gestão da energia servindo como base para a implementação de medidas de racionalização de energia económicas e tecnologicamente exequíveis [23].

A primeira etapa de uma auditoria energética passa pela caracterização energética da instalação para o ano de referência considerado onde se expõem os consumos por tipo de energia primária e os respetivos custos associados. De modo a apresentar a contabilidade energética de uma forma coerente o SGCIE consagra a tep (tonelada equivalente de petróleo) como a unidade utilizada para o efeito [23].

A partir deste levantamento inicial, procede-se à dissecação do consumo energético por setores produtivos e serviços auxiliares, onde se contemplam os respetivos equipamentos associados. A análise do consumo energético por equipamentos permite uma análise mais fina e detalhada da utilização da energia pela instalação, permitindo efetivamente exprimir como a energia é distribuída e transformada, sendo por isso fundamental a realização de balanços de massa e energia.

Após a contabilidade energética procede-se ao cálculo dos indicadores energéticos da instalação. Para o efeito, o SGCIE contempla o cálculo de três indicadores [23]:

- **Intensidade Energética (IE):** Expressa em unidades kgep/€. Rácio entre o consumo total de energia primária (E, expressa em kgep) e o Valor Acrescentado Bruto (VAB, em euros).

$$IE = \frac{E}{VAB} \quad (4.1)$$

- **Consumo Específico de Energia (CEE):** Expresso em kgep/unidade de produção. Quociente entre o consumo de energia primária (E, expressa em kgep) e a produção (P, expressa em unidades de produção). Este indicador pode ser aplicado a toda a instalação ou somente a um determinado setor,

equipamento ou produto. Pode igualmente cacular-se CEE parciais de acordo com a forma de energia primária considerada.

$$CEE = \frac{E}{P} \quad (4.2)$$

- **Intensidade Carbónica (IC):** Expressa em ton CO<sub>2</sub>e/tep. Quociente entre a quantidade de emissões de gases de efeito de estufa com consequência do consumo dos vários tipos de energia (GEE, expresso em toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> (ton CO<sub>2</sub>e)) e o consumo total de energia primária (E, expressa em tep).

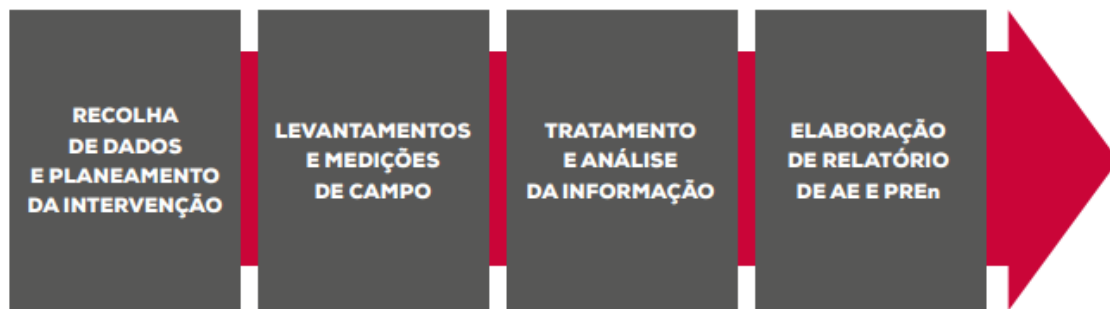
$$IC = \frac{GEE}{E} \quad (4.3)$$

Por fim, mas não menos importante, a última fase de uma auditoria energética consiste na apresentação e descrição de medidas de racionalização e otimização dos consumos energéticos tendo como objetivo final a redução dos custos associados sem qualquer prejuízo para a produção e qualidade dos produtos [23].

As medidas de boa gestão energética são compiladas no Plano de Racionalização de Energia (PREn), onde se prevê que sejam implementadas no espaço de três anos. As medidas apresentadas terão que garantir um Período de Retorno do Investimento (PRI) igual ou inferior a cinco anos no caso de instalações que apresentem um consumo igual ou superior a 1000 tep/ano ou igual ou inferior a três anos para as restantes instalações. O PREn ainda estabelece metas relativamente à IE, CEE e IC. Para as instalações que apresentem um consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano deverá ocorrer uma melhoria de pelo menos 6% da IE e CEE no prazo de 6 anos ou 4% para as restantes instalações. Para ambos os casos deverá mitigar-se as emissões de GEE em que no mínimo se mantenham os valores históricos da IC [23].

Na **Figura 4.1**, encontra-se reпреntadas as etapas sequenciais constituintes da realização de uma auditoria energética na indústria [23].

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação



**Figura 4.1** - Etapas de uma auditoria energética [23]

## 5. Caracterização Energética Continental Mabor: Global e Setor da Misturação

O capítulo que aqui se desenvolve encontra-se dividido em três secções. No **subcapítulo 5.1** apresenta-se as condições energéticas atuais da Continental Mabor – Indústria de Pneus (aqui doravante designada por CMIP) referentes ao ano de 2022. No **subcapítulo 5.2**, caracteriza-se energeticamente o setor da misturação, onde numa primeira fase se avalia o processo de uma forma global e posteriormente procede-se à análise por equipamentos e serviços auxiliares. Esta análise é complementada pelo cálculo do CEE em cada mês do ano de 2022.

Finalmente, no **subcapítulo 5.3** realiza-se o cálculo do CEE dos 10 principais compostos de borracha produzidos pela CMIP em 2022, expondo-se a metodologia adotada para o efeito.

### 5.1 Levantamento Energético CMIP

No ano de 2022, a CMIP operou 24 horas por dia, 7 dias por semana havendo apenas paragens para manutenção entre os dias 12 e 20 do mês de agosto e os dias 20 a 31 dezembro.

Durante o ano de referência desta auditoria (2022), a CMIP utilizou no seu processo produtivo energia primária sob três formas distintas: gás natural, vapor e energia elétrica.

O consumo de energia elétrica concentrou-se essencialmente na alimentação de motores elétricos, produção de ar comprimido e para iluminação dos espaços fabris.

O ar comprimido gerado na central das utilidades possui dois níveis de pressão distintos: “Ar alta” - produzido a 10 bar e “Ar baixa” - produzido a 6 bar. No setor da misturação existe ainda duas centrais de ar comprimido, a 6 bar, para o transporte de negro de fumo, tal como explicado no **Capítulo 3**.

O consumo de vapor concentrou-se nas etapas de preparação (calandras) e da vulcanização (prensas) e aquecimento ambiente (AVAC). O vapor é fornecido à CMIP

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

por uma empresa externa em três caldeiras que consomem gás natural. Duas destas são para a produção de vapor a 19 bar(r) e uma para a produção a 26 bar(r). Uma das caldeiras que produz vapor a 19 bar(r) é do tipo regenerativa que, em condições de cogeração pura, realiza o aproveitamento do calor contido nos gases de combustão da turbina a gás para a produção de vapor.

O consumo de gás natural serviu principalmente para a produção de águas quentes sanitárias (AQS), cozinha e balneários.

Posto isto, na **Tabela 5.1** apresentam-se os consumos de energia elétrica, vapor e gás natural para o ano de referência de 2022 bem como os respetivos custos associados. No **Anexo A.1**, encontra-se os valores que dão origem à **Tabela 5.1**, assim como os respetivos exemplos de cálculo.

Tabela 5.1 – Consumo de energia e custos respetivos no ano de 2022 na CMIP

| Tipo de Energia  | Consumo (kWh) | Fatores de conversão (tep/kWh) <sup>1</sup> | Consumo (tep) <sup>1</sup> | Custo (€)            |
|------------------|---------------|---------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Energia Elétrica | 166 694 780   | 2,15E-04                                    | 35 843                     | 44.195.071,35        |
| Ar Comprimido    | 16 710 926    |                                             | 3593                       |                      |
| Vapor            | 153 608 072   | 9,55E-05                                    | 14 675                     | 20.437.314,53        |
| Gás Natural      | 592 127       | 8,60E-05                                    | 50,9                       | 28.951,86            |
| <b>Total</b>     | -             | -                                           | <b>54 162</b>              | <b>64 661 337,74</b> |

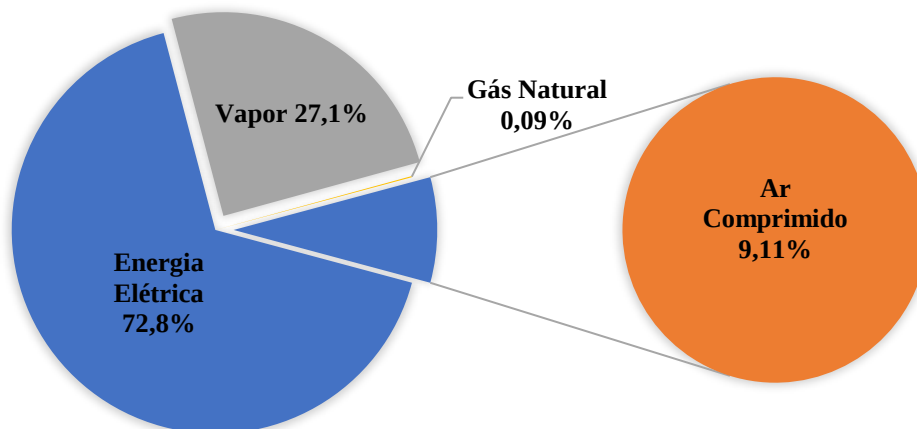
<sup>1</sup> – Ver Anexo A.2.

Relativamente ao consumo global de energia primária (**54 162 tep**), a distribuição dos consumos revelou que a fonte de energia mais consumida foi a energia elétrica com cerca de 72,8%, onde cerca de 9% desta está destinada à produção de ar comprimido. Em segundo lugar destaca-se o vapor com 27,1% e, por fim, representando um consumo marginal face às duas primeiras situa-se o gás natural com 0,09%.

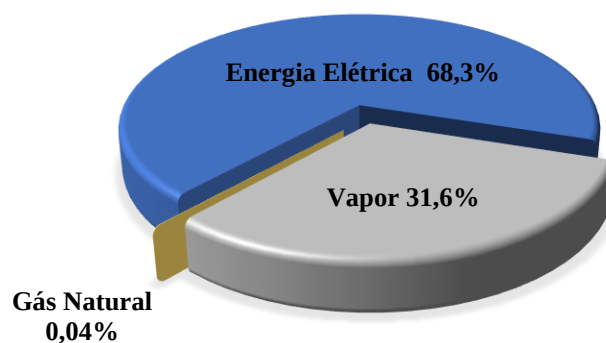
Em relação ao custo, a energia elétrica representa a maioria desse encargo com 68,3%, seguido do vapor com 31,6% e o gás natural com 0,04%, relativamente a um custo total de 64.661.337,74 €.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Nas **Figuras 5.1 e 5.2**, representam-se graficamente a repartição dos consumos e dos custos, respetivamente, por forma de energia.



**Figura 5.1** - Repartição do consumo de energia no ano de 2022 na CMIP



**Figura 5.2** – Distribuição dos custos por forma de energia primária no ano de 2022 na CMIP

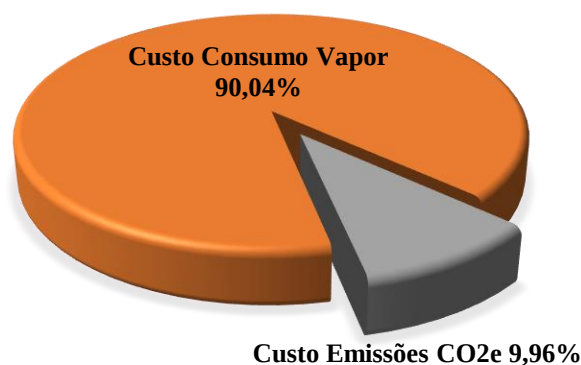
Verifica-se assim que, em 2022, o custo da energia elétrica foi igual a 240,95 €/MWh, o do vapor igual a 133,05 €/MWh e 48,89 €/MWh no caso do gás natural. Um exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo A.2**.

Tal como referido anteriormente, a energia elétrica representa a maior fatia do custo energético (**Figura 5.2**), no entanto, os custos relacionados com o consumo de vapor representam o cenário mais problemático, uma vez que, durante o ano de 2022 assistiu-se a um aumento bastante considerável do custo de gás natural o que se traduziu em

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

encargos económicos mais severos para a CMIP. Desta forma, a mitigação do consumo de vapor deve ser uma preponderância primordial.

Para além dos custos relacionados com o consumo de energia, a CMIP tem ainda que suportar parte dos custos relacionados com as licenças CELE (Comércio Europeu de Licenças de Emissão) devido à produção de vapor pela empresa externa. No ano de 2022, as emissões atribuídas à CMIP foram iguais a 28 271 ton CO<sub>2</sub>e . O custo por tonelada de CO<sub>2</sub> emitido situou-se nos 80 €/ton CO<sub>2</sub>, pelo que o custo total durante o ano referido ascendeu aos 2.261.662.87 €, correspondendo a cerca de 10% do custo relacionado com o consumo de vapor tal como se apresenta na **Figura 5.3**, perfazendo assim um custo total relacionado com a produção de vapor de 22.698.976,40 € (**Ver Anexo A.3**).



**Figura 5.3** - Custos associados à produção de vapor

O consumo de energia discriminado até este ponto teve como objetivo último o auxílio na produção gerada durante o período do ano de referência considerado. Em 2022, a produção de pneus pela CMIP atingiu os 18 084 589 pneus que correspondem a 200 916 toneladas.

Recorrendo aos consumos de energia, representados na **Tabela 5.1**, e à produção gerada durante o mesmo período, torna-se possível calcular os consumos específicos para cada forma de energia primária, através da aplicação da **Equação 4.2**. A apresentação dos consumos específicos mencionados encontram-se na **Tabela 5.2**. O exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo A.4**.

**Tabela 5.2** - Consumo específico total e por forma de energia primária da CMIP em 2022

| CEE                     | kWh/ton     | kgep/ton     |
|-------------------------|-------------|--------------|
| <b>Energia Elétrica</b> | 913         | 196          |
| <b>Vapor</b>            | 765         | 73,0         |
| <b>Gás Natural</b>      | 2,95        | 0,253        |
| <b>Total</b>            | <b>1680</b> | <b>269,6</b> |

O somatório dos consumos específicos por forma de energia primária, em kgep/ton, permite calcular o consumo específico total da CMIP, no ano de 2022, sendo esse valor igual a 269,6 kgep/ton.

## 5.2 Levantamento Energético do Setor da Misturação

A misturação é a primeira e decisiva etapa no processo de fabrico de um pneu. As duas principais formas de energia utilizadas neste setor são a energia elétrica, onde se inclui o ar comprimido, e vapor, sendo que este possui apenas uma função de aquecimento do ar ambiente.

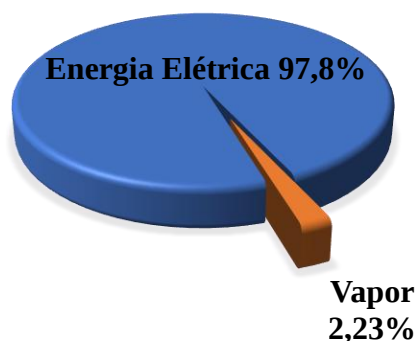
A contabilização global dos consumos de energia elétrica e vapor foram retirados do software de gestão de energia da CMIP (*MessDas*), podendo ser consultados na **Tabela 5.3** assim como os respetivos custos no ano de 2022. Os exemplos de cálculo encontram-se no **Anexo B.1**.

**Tabela 5.3** - Consumo de energia no setor da misturação no ano de 2022

| Tipo de Energia         | Consumo (kWh) | Consumo (tep) | Custo (€)            |
|-------------------------|---------------|---------------|----------------------|
| <b>Energia Elétrica</b> | 78 856 980    | 16 954        | 19 000 407,03        |
| <b>Ar Comprimido</b>    | 1 989 934     | 428           | 479 470,11           |
| <b>Vapor</b>            | 4 155 510     | 397           | 552 884,06           |
| <b>Total</b>            | -             | <b>17 779</b> | <b>20 032 761,19</b> |

Na **Figura 5.4**, representa-se a repartição percentual de cada forma de energia empregue no setor da misturação, relativamente ao consumo total de 17 779 tep.

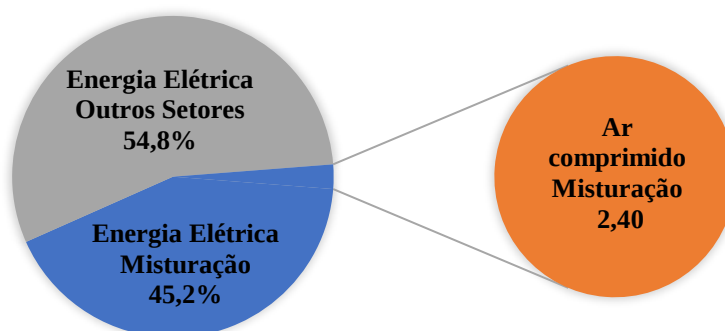
## Auditoria Energética ao Processo de Misturação



**Figura 5.4** - Repartição do consumo de energia no setor da misturação no ano de 2022

Analizando a **Tabela 5.3** e a **Figura 5.4**, verifica-se que o setor da misturação é um consumidor intensivo de energia elétrica uma vez que no ano de 2022 esse consumo foi igual a 17 382 tep (onde se inclui o ar comprimido) correspondendo a 97,8% do consumo total de energia neste setor, com um custo total para a CMIP de cerca de 19,5 milhões de euros. O consumo de ar comprimido atingiu os 428 tep, correspondendo a cerca de 2,4% do consumo total de energia elétrica neste setor.

O consumo de energia elétrica da misturação quando comparado com o consumo de energia elétrica da CMIP, mostra que este setor é o maior consumidor de energia elétrica da fábrica com uma representação de, aproximadamente, 45%. Na **Figura 5.5** ilustra-se graficamente a informação exposta nos parágrafos anteriores.



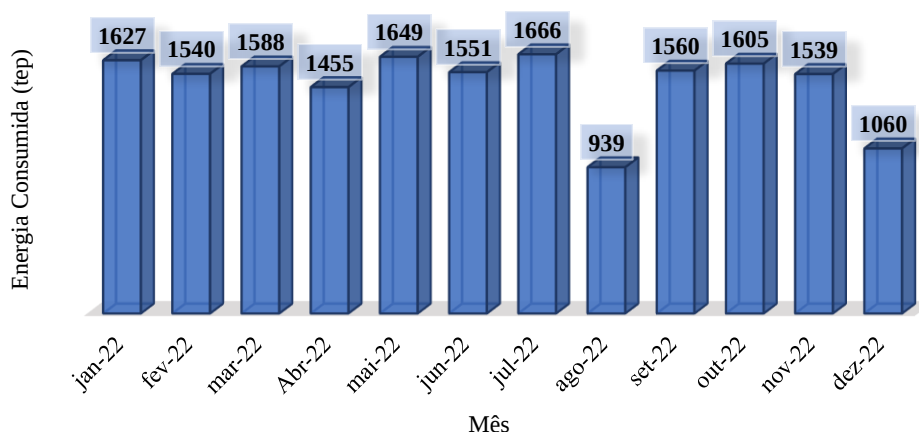
**Figura 5.5** - Comparação do consumo de energia elétrica no setor da misturação em relação ao consumo homólogo pela CMIP

O consumo de vapor corresponde a apenas 2,23% do consumo total de energia consumida pela misturação e a cerca de 2,7% do consumo de vapor total da CMIP. Em

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

termos monetários o consumo de vapor no setor da misturação corresponde a, aproximadamente, 553 mil euros.

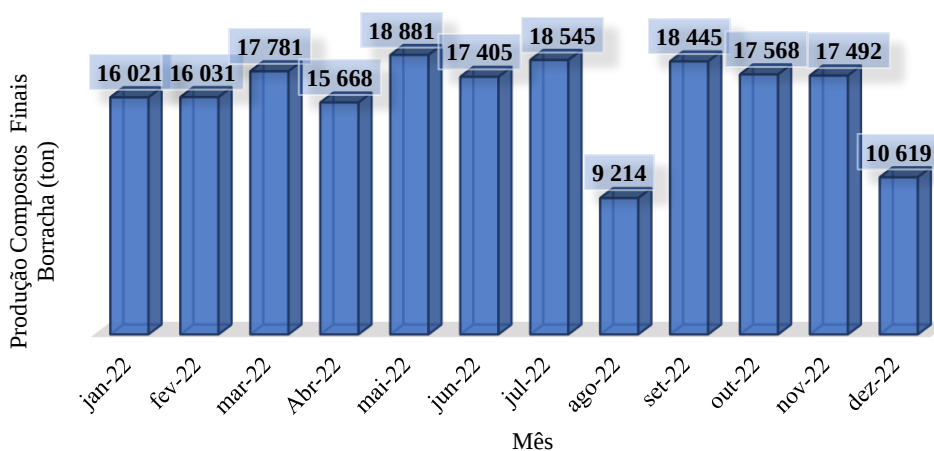
Extendendo agora a análise para uma base mensal com o objetivo de calcular os consumos específicos relativos ao setor da misturação, na **Figura 5.6** representa-se o consumo de energia, em tep, relativo a cada mês do ano de 2022.



**Figura 5.6** - Consumo de energia mensal, em tep, na área da misturação no ano de 2022

Tal como é expectável os meses de agosto e de dezembro apresentam um consumo de energia mais baixo que a tendência normal devido às paragens para manutenção programadas para estes meses.

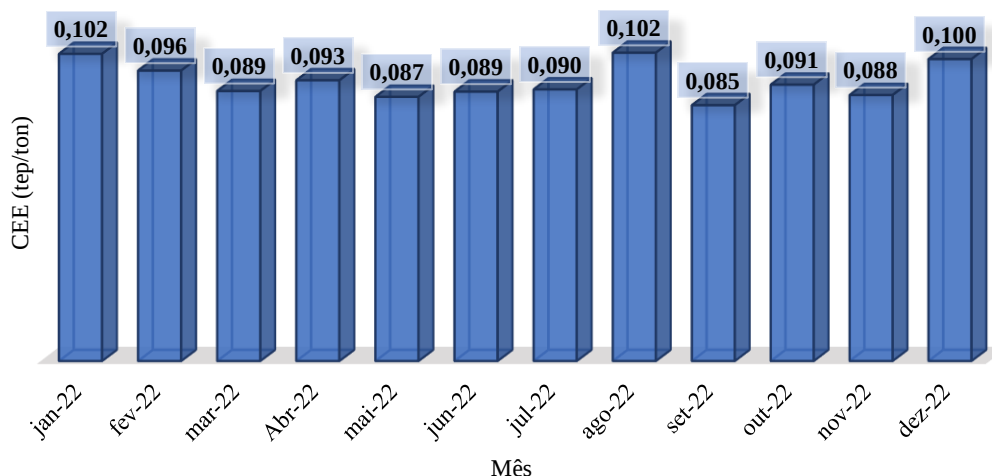
De forma análoga, na **Figura 5.7** apresenta-se a produção, em toneladas, de compostos finais de borracha, i.e, compostos que transitam para a etapa da preparação, em toneladas, relativo a cada mês do ano de 2022.



**Figura 5.7** - Produção mensal, em ton, de compostos de borracha no ano de 2022

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Com base nos dados anteriores tornou-se possível calcular os consumos específicos mensais no setor da misturação, durante o ano de 2022, encontrando-se graficamente representados na **Figura 5.8**. O exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo B.3**.

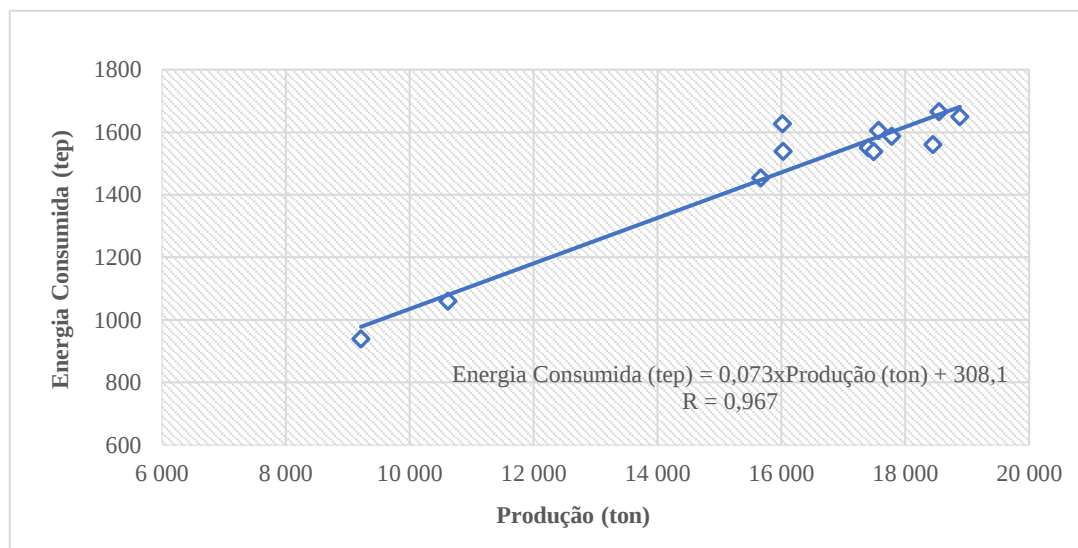


**Figura 5.8** - Consumos específicos mensais, em tep/ton, no setor da misturação para o ano de 2022

Analisando a **Figura 5.8**, é possível constatar que os consumos específicos no setor da misturação encontram-se sensivelmente dentro da mesma gama de valores exceto para os meses de janeiro, fevereiro, agosto e dezembro, onde se nota um ligeiro aumento. Relativamente aos meses de agosto e dezembro as discrepâncias observadas podem ser resultantes das paragens para manutenção o que poderá ter exigido um consumo de energia superior, sendo que a produção é notoriamente inferior aos meses restantes. Nos meses de janeiro e fevereiro a explicação pela qual os valores dos consumos específicos se encontram ligeiramente superiores ao resto do ano deve-se ao facto de que estes meses foram os mais frios durante o ano em consideração, o que inevitavelmente exigiu um maior consumo de vapor para necessidades de aquecimento na nave fabril, levando assim a um aumento da energia consumida. Outra explicação para este facto poderá estar relacionado com o fenómeno de congelamento da borracha o que obriga os motores elétricos das misturadoras a consumirem mais energia elétrica devido à maior regularidade da existência de picos de potência. No panorama geral, o consumo específico médio no setor da misturação, em 2022, foi igual a 0,093 tep/ton.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

De forma a continuar a avaliar o desempenho energético do setor em questão, correlacionou-se os dados da energia consumida provenientes da **Figura 5.6** com os dados da produção de compostos de borracha (**Figura 5.7**), obtendo-se assim a **Figura 5.9**.



**Figura 5.9** - Correlação entre a energia consumida e a produção de compostos de borracha no setor da misturação no ano de 2022

Avaliando a correlação apresentada pela **Figura 5.9**, constata-se que o valor do coeficiente de correlação (R) apresenta um valor satisfatório (0,967) o que indica que o setor da misturação já se encontra bastante otimizado sob o ponto de vista energético, havendo, no entanto, potencial para poupanças energéticas. O valor da ordenada na origem ascende aos 308,1 tep, sendo este o valor de energia dispendida para manter as perdas permanentes associadas a este setor produtivo, isto é, trata-se de um consumo de energia que não se encontra associado diretamente à produção dos compostos de borracha. O declive da reta de tendência (0,073 tep/ton) refere-se ao consumo de energia que foi necessária para produzir os compostos de borracha durante o ano de 2022, ou seja, trata-se do consumo específico de energia diretamente ligado à produção, sendo assim inferior a 0,093 tep/ton.

### 5.2.1 Distribuição dos consumos de Energia Elétrica

A energia elétrica no setor da misturação é utilizada por diferentes secções de entre as quais se destacam as seguintes:

- Misturadoras;
- Strainers;
- Ar comprimido – Negro de Fumo;
- Ar comprimido – Serviços Auxiliares;
- Quadro óleos;
- Ventilação;
- Torres de Refrigeração;
- Área de Baterias;
- Armazém automático – ACS (*Automatic Compound Storage*);
- Iluminação;
- Quadro Usos Gerais (QUG)

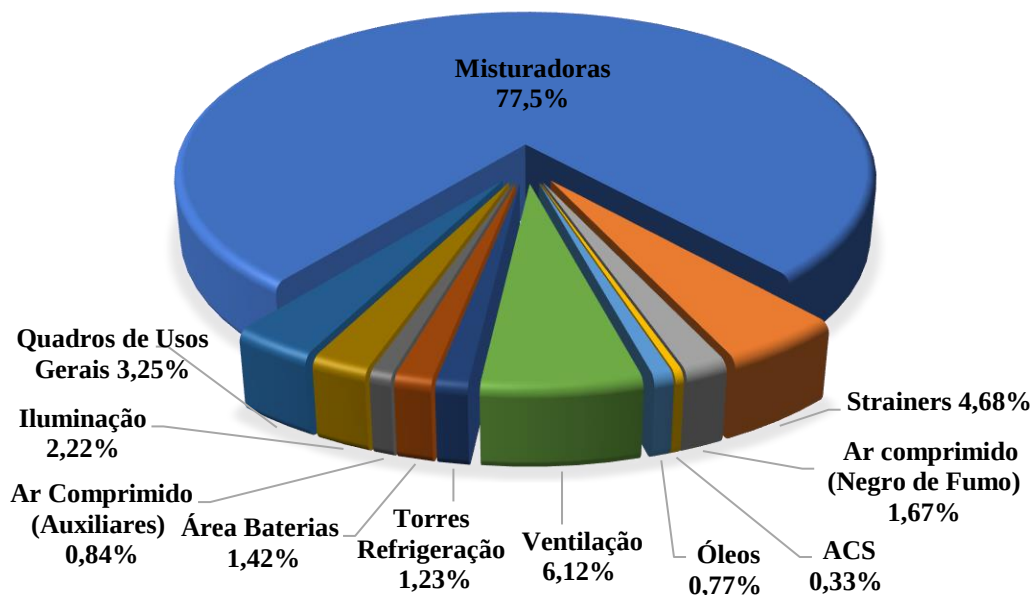
Na **Tabela 5.4**, apresentam-se assim os consumos energéticos das secções, retirado do *MessDas*, como também os respetivos custos associados.

**Tabela 5.4** - Distribuição dos consumos de energia elétrica e custos associados no setor da misturação no ano de 2022

| Equipamento                              | Consumo (kWh) | Consumo (tep) | Custo (€)     |
|------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Misturadoras</b>                      | 61 357 128    | 13 192        | 14 783 858,21 |
| <b>Strainers</b>                         | 3 709 755     | 798           | 893 856,98    |
| <b>Ar comprimido<br/>(Negro de Fumo)</b> | 1 324 363     | 285           | 319 102,16    |
| <b>ACS</b>                               | 264 688       | 57            | 63 776,01     |
| <b>Óleos</b>                             | 609 633       | 131           | 146 889,66    |
| <b>Ventilação</b>                        | 4 846 505     | 1 042         | 1 167 754,23  |
| <b>Torres<br/>Refrigeração</b>           | 971 443       | 209           | 234 067,05    |
| <b>Área Baterias</b>                     | 1 126 159     | 242           | 271 345,30    |
| <b>Ar Comprimido<br/>(Auxiliares)</b>    | 665 572       | 143           | 160 367,94    |
| <b>Iluminação</b>                        | 1 759 760     | 378           | 424 010,01    |
| <b>Quadros de Usos<br/>Gerais</b>        | 2 575 449     | 554           | 620 548,56    |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Na **Figura 5.10**, apresenta-se um gráfico com a divisão percentual do consumo de energia elétrica pelos vários equipamentos no setor da misturação. Os dados em bruto que dão origem à **Tabela 5.4** e à **Figura 5.10** encontram-se no **Anexo B.4**.



**Figura 5.10** - Distribuição percentual dos consumos de energia elétrica no setor da misturação no ano de 2022

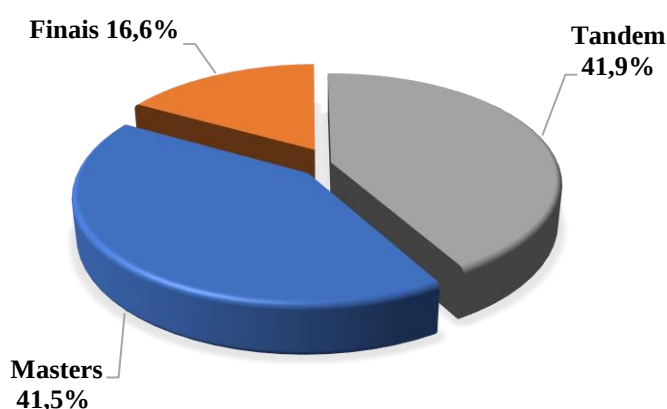
A análise da **Tabela 5.4** e da **Figura 5.10** permite esclarecer que os principais consumidores de energia elétrica na área da misturação são as misturadoras, contabilizando 77,5% do consumo total com um custo respetivo de cerca de 15 milhões de euros. A ventilação e as strainers fecham o pódio com 6,12% e 4,68%, respetivamente. O custo dispendido com ventilação foi superior a 1 milhão de euros e das strainers foi sensivelmente igual a 900 mil euros. O consumo de energia elétrica alocada ao quadro dos usos gerais contabiliza 3,25% com um custo de, aproximadamente, 621 mil euros. Verifica-se igualmente que a iluminação possui um peso considerável, contabilizando 2,22% do consumo elétrico total e que o ar comprimido destinado ao transporte de negro de fumo ascende aos 1,67%.

Com o intuito de esclarecer como se processa a utilização da energia elétrica pelas secções das misturadoras, ventilação, iluminação, ar comprimido para o transporte de negro de fumo procedeu-se à distribuição destes consumos, apresentados na **Tabela 5.4**, pelo conjunto de equipamentos que cada secção engloba.

- **Misturadoras**

No **Capítulo 3**, referiu-se que a CMIP possui 12 linhas de misturação onde 8 possuem misturadores *Single* (ML00 até ML07) e 4 possuem misturadores Tandem (ML09 até ML12). Dentro das misturadoras *Single*, as linhas ML00, ML01 e ML03 produzem compostos finais e as restantes produzem compostos *master*.

Assim, na **Figura 5.11**, representa-se a distribuição do consumo de energia elétrica pelas misturadoras por tipo de linha considerada: *master*, finais ou Tandem (Ver **Anexo B.5**).

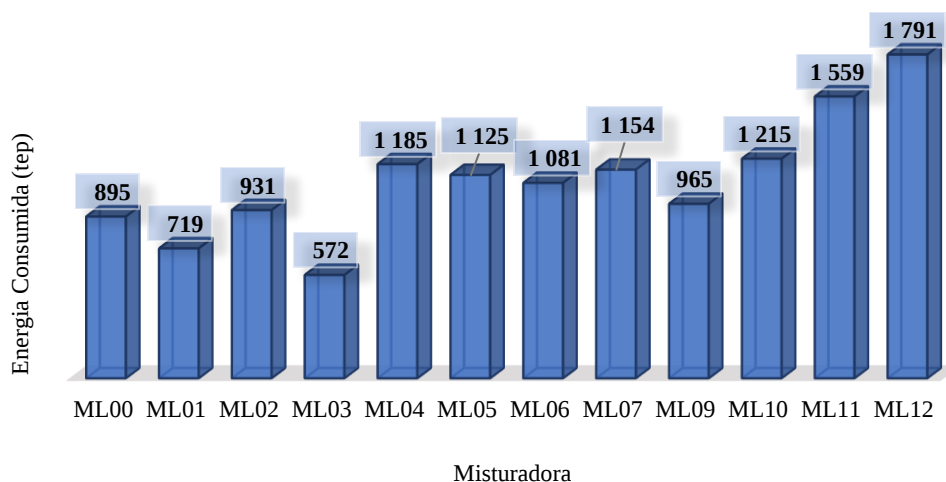


**Figura 5.11** - Distribuição do consumo de energia elétrica das misturadoras por tipo de linha de misturação

Pela **Figura 5.11**, repara-se que a energia consumida pelas misturadoras do tipo master é semelhante às misturadoras Tandem, com as primeiras a representar 41,5% da energia total consumida pelas misturadoras e as misturadoras Tandem 41,9%. As misturadoras finais representam apenas 16,6%. Relativamente aos custos operacionais, as misturadoras master e Tandem situam-se ambas em cerca de 6 milhões de euros e as misturadoras finais em 2,5 milhões de euros.

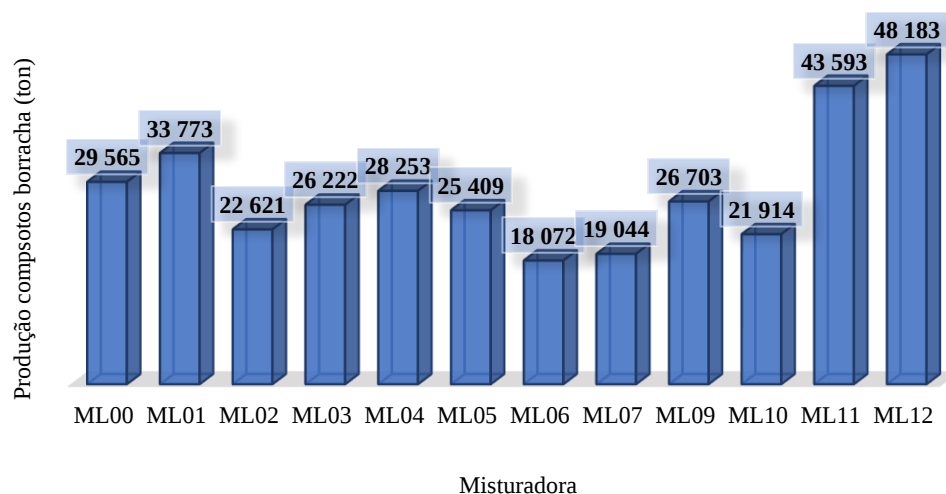
Analisando agora cada misturadora de forma individual, na **Figura 5.12**, encontra-se representada a energia elétrica consumida por cada misturadora no ano de 2022.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação



**Figura 5.12** - Consumo de energia elétrica, em tep, por misturadora no ano de 2022

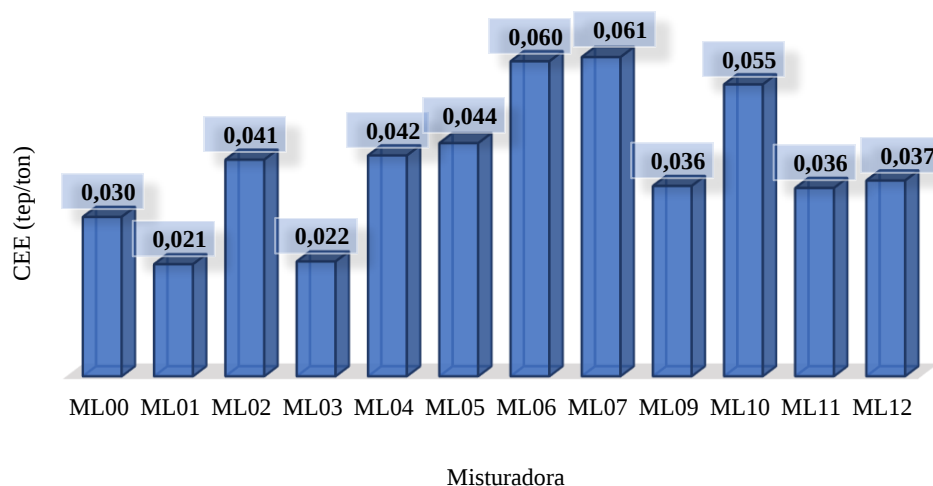
Pela **Figura 5.12**, constata-se que a misturadora que apresenta o maior consumo de energia elétrica foi a misturadora 12 e a que apresentou o menor foi a misturadora 03. De um modo geral é notório que o consumo de energia elétrica pelas misturadoras não é uniforme, devido essencialmente ao facto de cada misturadora poder produzir múltiplos compostos de borracha que possuem receitas de fabrico distintas entre si. Esta variabilidade receitual implica que as condições de operação de cada misturadora, como por exemplo, a velocidade da rotação dos motores elétricos, também variem, resultando em consumos de energia elétrica distintos e não uniformes. De igual forma, a produção observada em cada misturadora também é significativamente diferente, o que mais uma vez provoca alterações dos consumos energéticos entre misturadoras. Posto isto, na **Figura 5.13**, apresenta-se a produção alcançada em cada misturadora no ano de 2022.



**Figura 5.13** - Produção, em ton, de compostos de borracha por misturadora no ano de 2022

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Recorrendo-se à informação presente nas **Figuras 5.12 e 5.13**, foi possível calcular os consumos específicos relativos a cada misturadora, durante o ano de 2022, estando estes representados graficamente na **Figura 5.14**. O exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo B.6**.



**Figura 5.14** - Consumos específicos de energia, em tep/ton, de cada misturadora no ano de 2022

Observando a **Figura 5.14**, nota-se claramente que as misturadoras que apresentaram um maior consumo específico de energia no ano de 2022 foram as misturadoras *master* 06 e 07. De facto, quando se comparam os dados da energia (**Figura 5.12**) com os dados da produção dos compostos de borracha (**Figura 5.13**), relativamente às misturadoras do tipo *master*, verifica-se que possuem um consumo de energia sensivelmente idêntico, sendo que, no entanto, as misturadoras 06 e 07 apresentam valores de produção notoriamente inferiores, traduzindo-se assim em consumos específicos superiores. As misturadoras 06 e 07 são as responsáveis pela produção de compostos *master* que contêm sílica na receita de mistura, que, tal como foi explicado no **Capítulo 3**, dificulta o processo de misturação, o que consequentemente se torna mais exigente em termos energéticos como também se obtém menores valores de produção devido à exigência de tempos de ciclo de mistura superiores.

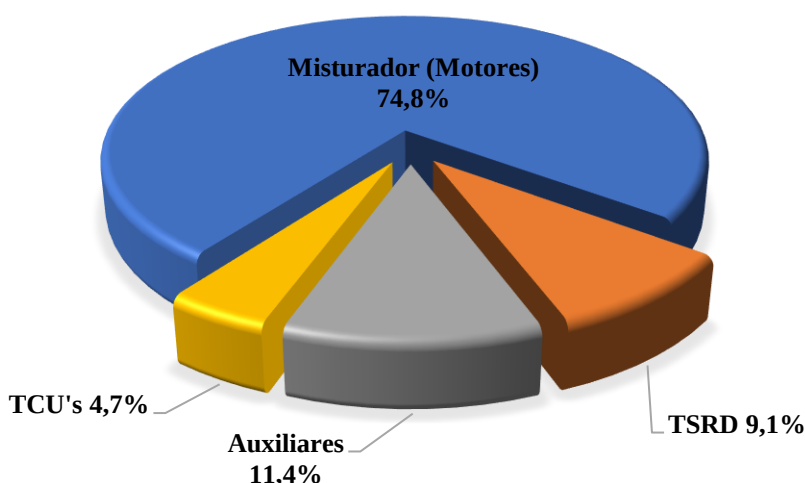
Em termos quantitativos, as misturadoras 06 e 07 apresentam em comparação com as restantes misturadoras *Single master* um consumo energético por tonelada de composto produzido cerca de 41% e 43% superior, respetivamente.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Dentro da classe das misturadoras *Big Tandem*, a misturadora 10 apresenta um consumo específico cerca de 52% superior às misturadoras 11 e 12. A justificação para esta ocorrência é a mesma que se apresentou para as misturadoras 06 e 07, uma vez que a misturadora 10 também é responsável pela produção de compostos *master* que possuem sílica na sua composição.

Comparando agora os consumos específicos entre as misturadoras *Tandem* e as misturadoras *Single*, (excetuando as misturadoras 06, 07 no caso das misturadoras *Single* e 10 no caso das misturadoras *Tandem*), verifica-se que as misturadoras *Tandem* são mais eficientes em termos energéticos que as misturadoras *Single* em cerca de 14%. As misturadoras do tipo *Tandem* além de possuírem câmara de mistura com maior capacidade e, conseqüentemente maior produção, nomeadamente as misturadoras 11 e 12 possuem a capacidade de produzir compostos de borracha de forma contínua e consecutiva o que permite reduzir os tempos de produção como também reduzir o consumo de energia associado à produção de um determinado composto.

O consumo de energia elétrica em cada máquina de mistura é constituída por diferentes equipamentos (**Ver Capítulo 3**). Tendo em conta as misturadoras *Tandem* (visto que são as misturadoras onde existe uma maior quantidade de informação dos consumos por equipamento) a distribuição dos consumos de energia elétrica por tipo de equipamento pode ser consultado na **Figura 5.15**.



**Figura 5.15** - Distribuição do consumo de energia elétrica por tipo de equipamento nas misturadoras Tandem

Pela **Figura 5.15**, visualiza-se que a maior quantidade de energia elétrica consumida pelas misturadoras *Tandem* diz respeito aos motores do misturador contabilizando 74,8%. Os equipamentos auxiliares de entre os quais se incluem o *batch-off*, IBC's, Multidosing e Siemens Control constituem o grupo de equipamentos com a maior fatia do consumo elétrico das misturadoras (11,4%) após os motores do misturador. A extrusora/calandra (designada por TSRD) constitui a terceira maior contribuição com 9,1% e finalmente as TCU's representam 4,7%. O exemplo de cálculo da distribuição dos consumos por tipo de equipamento presente nas linhas de misturação encontra-se no **Anexo B.7**.

- **Ar Comprimido – Transporte de Negro de Fumo**

O ar comprimido utilizado para o transporte de negro de fumo é gerado por duas centrais, estando uma associada à área da misturação antiga (ML00 até ML09) e a outra à misturação nova (ML10 até ML12). A central de ar comprimido da misturação antiga possui cinco compressores enquanto que na misturação nova a central apenas contém 2 compressores. Na **Tabela 5.5 e 5.6**, encontram-se as características relativas a cada compressor de cada compressor assim como as respetivas condições de funcionamento implementadas atualmente.

**Tabela 5.5** - Características gerais dos compressores da central de negro de fumo da área da misturação antiga

| Central Negro de Fumo - Misturação Antiga | Controlo | Tipo     | Set-Point Pressão (bar) | Potência Nominal (kW) | Caudal total (Nm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------------------|----------|----------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| <b>Compressor 1</b>                       | C/V      | Parafuso | 6                       | 75                    | 822                             |
| <b>Compressor 2</b>                       | C/V      | Parafuso | 6                       | 75                    | 822                             |
| <b>Compressor 3</b>                       | C/V      | Parafuso | 6                       | 75                    | 819                             |
| <b>Compressor 4</b>                       | C/V      | Parafuso | 6                       | 75                    | 849                             |
| <b>Compressor 5</b>                       | C/V      | Parafuso | 6                       | 75                    | 824                             |

**Tabela 5.6** - Características gerais dos compressores da central de negro de fumo na área da misturação nova

| Central Negro de Fumo - Misturação Nova | Controlo | Tipo     | Set-Point Pressão (bar) | Potência Nominal (kW) | Caudal total (Nm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------------|----------|----------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| <b>Compressor 180 kW</b>                | C/V      | Parafuso | 6                       | 180                   | 1812                            |
| <b>Compressor 260 kW</b>                | VSD      | Parafuso | 6                       | 260                   | 2491                            |

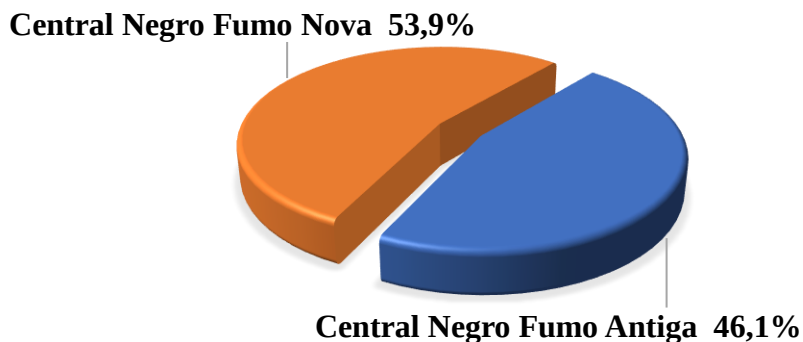
## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Na **Tabela 5.7**, apresentam-se os consumos de energia elétrica associados a cada central de ar comprimido para o transporte de negro de fumo assim como o respetivo custo associado

**Tabela 5.7** - Consumos de energia elétrica de cada central de ar comprimido para o transporte de negro de fumo

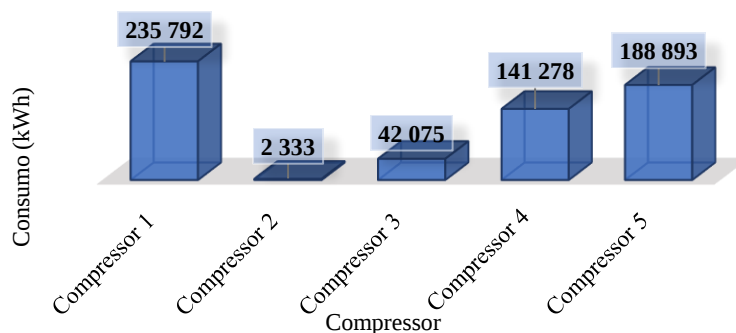
| <b>Central Ar comprimido<br/>Negro Fumo</b> | <b>Consumo<br/>(kWh)</b> | <b>Consumo<br/>(tep)</b> | <b>Custo (€)</b> |
|---------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Misturação Nova</b>                      | 713 992                  | 154                      | 172 035          |
| <b>Misturação Antiga</b>                    | 610 371                  | 131                      | 147 067          |
| <b>Total</b>                                | <b>1 324 263</b>         | <b>285</b>               | <b>319 102</b>   |

Na **Figura 5.16** mostra-se graficamente a distribuição do consumo de energia elétrica para a produção de ar comprimido em cada uma das centrais.



**Figura 5.16** - Distribuição do consumo de energia elétrica por central de ar comprimido para o transporte de negro de fumo

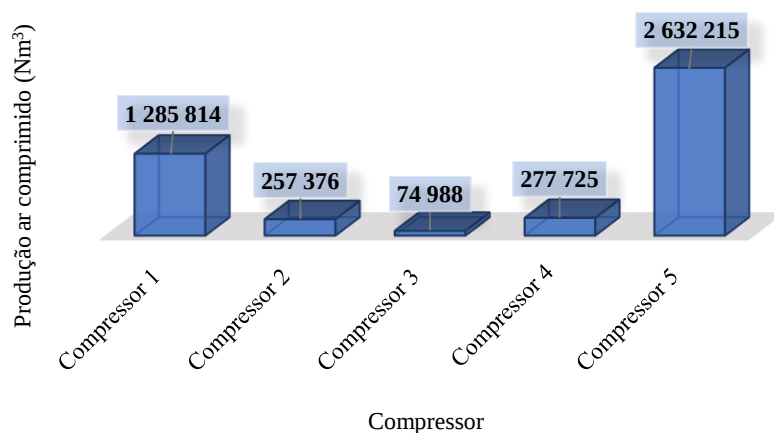
Efetuando agora uma análise à central de ar comprimido da misturação antiga, na **Figura 5.17** representa-se o consumo de energia elétrica, em kWh, de cada um dos compressores que constituem esta central.



**Figura 5.17** - Consumo de energia elétrica, em kWh, de cada compressor na central de negro de fumo da misturação antiga no ano de 2022

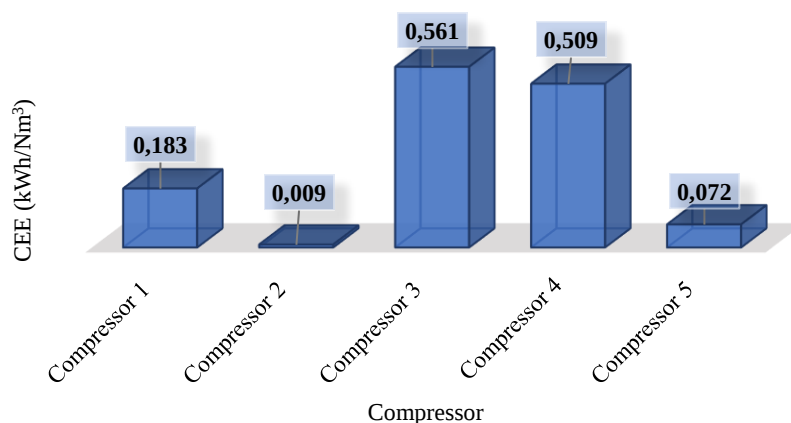
## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Na **Figura 5.18**, encontra-se representado a produção de ar comprimido, em  $\text{Nm}^3$ , de cada um dos compressores presentes na central de negro de fumo da misturação antiga.



**Figura 5.18** - Produção de ar comprimido, em  $\text{Nm}^3$ , de cada compressor na central de negro de fumo da misturação antiga no ano de 2022

Agregando os dados da energia elétrica consumida (**Figura 5.17**) com os dados da produção de ar comprimido (**Figura 5.18**), representam-se na **Figura 5.19** os respetivos consumos específicos de energia, em  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ . O exemplo de cálculo do cálculo do CEE dos compressores encontra-se presente no **Anexo B.8**.



**Figura 5.19** - Consumos específicos de energia, em  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ , de cada compressor na central de negro de fumo da misturação antiga no ano de 2022

Analisando a **Figura 5.18**, fica claro que o compressor 5 foi o principal visto que apresenta o maior consumo de ar comprimido apresentando um consumo específico de  $0,072 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$  (**Figura 5.19**). A central de negro de fumo encontra-se dimensionada para garantir o transporte de negro de fumo desde os camiões cisterna até aos silos

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

mensais e dos silos mensais até aos silos diários. Se ocorrerem estes dois transportes em simultâneo significa que se utilizam 4 dos 5 compressores da central sendo que o quinto compressor deverá ter uma função de reserva. Todavia, a produção efetiva de ar comprimido de cada compressor depende diretamente dos parâmetros de funcionamento implementados (pressão de funcionamento e tempo de vazio máximo) como também da quantidade de negro de fumo transportada.

Pela **Figura 5.18**, repara-se que o compressor que apresentou a menor produção de ar comprimido foi o compressor 3 o que se traduz no maior consumo específico de entre os 5 compressores da central (0,561 kWh/Nm<sup>3</sup>). Pode-se então dizer que o compressor 3 encontra-se definido como o compressor de reserva.

Relativamente ao compressor 2, pela **Figura 5.18**, verifica-se que este compressor é o que possui o menor consumo específico desta central, sendo que, no entanto, é apenas o quarto compressor que mais ar comprimido produz. Esta discrepância pode ser justificada pelo facto de este compressor estar programado com um tempo de vazio máximo superior aos restantes compressores.

De forma global, a central de negro de fumo da misturação antiga apresentou, em 2022, um consumo específico igual a 0,135 kWh/Nm<sup>3</sup> (Ver **Anexo B.8**). Este valor é, aproximadamente, 23% superior ao consumo específico da central de ar comprimido de baixa pressão da CMIP que apresentou durante o mesmo período o valor de 0,104 kWh/Nm<sup>3</sup>. Traduzindo esta diferença em custo, constata-se que se o ar comprimido para o transporte de negro de fumo proviesse da central de ar comprimido de baixa pressão significaria que se poderiam poupar cerca de 33 mil euros (Ver **Anexo B.8**).

Assim e face ao exposto no parágrafo anterior pode-se argumentar que existe margem para a implementação de estratégias que permitam reduzir os consumos de energia elétrica associados à central de negro de fumo da misturação antiga.

- **Iluminação**

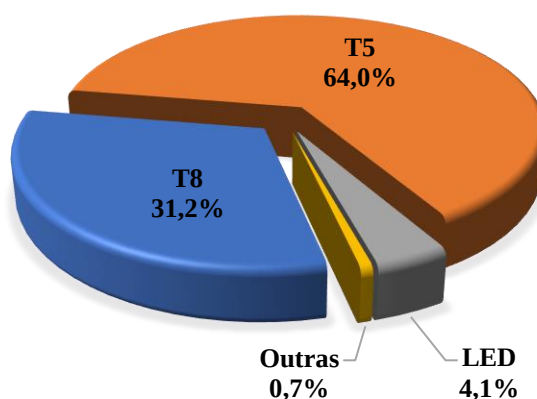
A iluminação no setor da misturação encontra-se fundamentalmente assegurada por lâmpadas fluorescentes T8 (56 kW, 36 kW e 18 kW) e T5 (54 kW, 49 kW e 28 kW) e por lâmpadas, painéis e armaduras LED.

Na **Tabela 5.8**, encontra-se representado o consumo de energia elétrica por tipo de iluminação, em kWh e tep, presente no setor da misturação como também o respetivo custo. O exemplo de cálculo do consumo de energia elétrica por tipo de luminária está presente no **Anexo B.4**.

**Tabela 5.8** -Consumo e custo de energia elétrica por tipo de iluminação no setor da misturação no ano de 2022

| Tipo de iluminação | Consumo (kWh)    | Consumo (tep) | Custo (€)         |
|--------------------|------------------|---------------|-------------------|
| <b>T8</b>          | 549 287          | 118           | 132 349,44        |
| <b>T5</b>          | 1 125 511        | 242           | 271 189,29        |
| <b>LED</b>         | 72 680           | 16            | 17 512,07         |
| <b>Outras</b>      | 12 282           | 3             | 2 959,20          |
| <b>Total</b>       | <b>1 759 760</b> | <b>378</b>    | <b>424 010,01</b> |

Na **Figura 5.20**, representa-se graficamente a distribuição percentual dos consumos de energia elétrica por tipo de iluminação (**Tabela 5.8**).



**Figura 5.20** - Distribuição percentual dos consumos de energia elétrica por tipo de iluminação no ano de 2022

Pela **Figura 5.20**, as lâmpadas T5 representam a maioria do consumo de energia elétrica responsável pela iluminação do setor da misturação com um valor igual a 64,0% com custo associado de cerca 270 mil euros. Seguidamente vêm as lâmpadas T8 e a

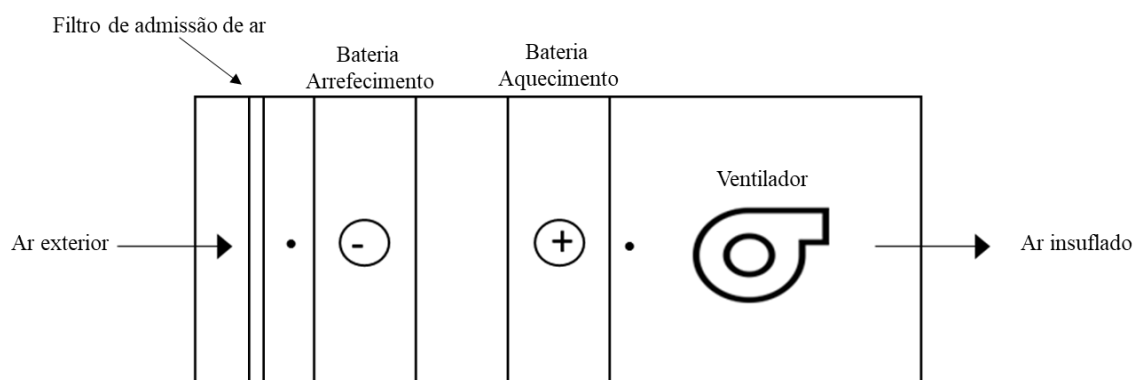
## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

iluminação LED com uma percentagem de 31,2% e 4,1% com um custo de, aproximadamente, 130 e 18 mil euros, respetivamente. Finalmente, outro tipo de iluminação que não se encontra distribuído pelas classes expostas anteriormente, contabiliza um consumo de energia elétrica marginal de 0,7%, representando um custo perto dos 3 mil euros.

- **Ventilação e Climatização**

No setor da misturação, o tratamento e climatização de ar são realizadas por 15 unidades de tratamento de ar (UTA's), sendo que 8 encontram-se presentes na zona da misturação velha (UTA 6; UTA 9 a UTA 15) e as outras 7 na misturação nova (UTA 18 a UTA 24). De referir que a UTA 6 pertence maioritariamente ao setor da preparação, no entanto engloba ainda uma parte da misturação velha. Cada UTA assegura a ventilação e climatização dos espaços fabris através da insuflação de apenas ar novo, sendo que a extração de ar se realiza através de ventiladores de extração (VEM) e ventiladores de extração e desenfumagem (VEDM).

Na **Figura 5.21**, apresenta-se um esquema típico de uma UTA onde se demonstra a circulação do ar desde o exterior até ao espaço fabril assim como os diversos elementos que a constituem.



**Figura 5.21** - Esquema típico representativo de uma UTA

As UTA's 9 a 15 possuem apenas um ventilador funcionando com um sistema de correia-transmissão enquanto que as UTA's da misturação velha possuem dois

ventiladores acoplados efetuando-se o controlo da velocidade da rotação das pás através de VSD.

A climatização é efetuada pelas baterias de arrefecimento/aquecimento que se encontram dentro das estruturas de cada UTA. As baterias de arrefecimento são alimentadas com água fria que provém de torres de arrefecimento (TA5, TA6 e TA7). A água das torres de arrefecimento TA5 e TA6 é bombada com o auxílio de dois conjuntos de bombas (BF 17.1/ BF 17.2 e BF 18.1/ BF 18.2) para um coletor de água que efetua a distribuição para as serpentinas das baterias de arrefecimento das UTA's presentes na misturação velha (primeiro conjunto) e UTA6 (segundo conjunto).

De forma homóloga, a água proveniente da TA7 é transportada para um outro coletor de água através de um conjunto de bombas (BF 29.1/ BF 29.2) alimentando as UTA's da misturação nova. De referir que o trajeto de ida e volta dos circuitos de água de arrefecimento são realizados de forma independente.

As baterias de aquecimento são alimentadas com vapor proveniente da central térmica. As UTA's afetas à misturação nova assim como a UTA 6 não possuem bateria de aquecimento.

Para além das baterias de aquecimento presentes nas UTA's, o aquecimento ambiente ainda é assegurado por termoventiladores alimentados com vapor, estando 11 presentes na misturação velha e 8 na misturação nova.

Posto isto, nas **Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11**, apresentam-se as características energéticas das UTA's, torres de arrefecimento, ventiladores de extração e desefumagem, repetivamente.

Tabela 5.9 - Características energéticas das UTA's no setor da misturação

| UTA's  | Zona Geral                      | Zona Específica (Misturadoras) | Potência Ventilador (kW) | Potência Aquecimento (kW) | Potência Arrefecimento (kW) |
|--------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| UTA 6  | Preparação/<br>Misturação Velha | 06; 07                         | 75                       | SI                        | SI                          |
| UTA 9  | Misturação Velha                | 01; 02                         | 22                       | 430                       | 157                         |
| UTA 10 |                                 | 09                             | 18,5                     | 430                       | 157                         |
| UTA 11 |                                 | 00; 01; 02; 03                 | SI                       | 430                       | 157                         |
| UTA 12 |                                 | 00; 01; 02                     | SI                       | 550                       | 186                         |
| UTA 13 |                                 | 04; 05                         | 75                       | 857                       | 320                         |
| UTA 14 |                                 | 03; 04; 05                     | 75                       | 857                       | 320                         |
| UTA 15 |                                 | 03; 04; 05                     | 75                       | 796                       | 302                         |
| UTA 18 | Misturação Nova                 | 10; 11; 12                     | 15                       | NA                        | 130                         |
| UTA 19 |                                 | 10; 11; 12                     | 18,5                     | NA                        | 191                         |
| UTA 20 |                                 | 10; 11; 12                     | 22                       | NA                        | 191                         |
| UTA 21 |                                 | 10; 11; 12                     | 11                       | NA                        | 107                         |
| UTA 22 |                                 | 10; 11; 12                     | 15                       | NA                        | 157                         |
| UTA 23 |                                 | 10; 11; 12                     | 15                       | NA                        | 157                         |
| UTA 24 |                                 | 10; 11; 12                     | 15                       | NA                        | 157                         |

Notas: SI – Sem informação; NA – Não Aplicável

Tabela 5.10 - Características energéticas das torres de arrefecimento associadas à climatização no setor da misturação

| Torres de arrefecimento | UTA's Associdas | Potência Arrefecimento (kW) | Potência Ventiladores (kW) | Potência Bomba Circulação (kW) | Potência Bombas Circuito (kW) |
|-------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| TA5                     | UTAP 9 a 15     | 800                         | 22,5                       | 5,5                            | 15,0                          |
| TA6                     | UTAP 9 a 15     | 800                         | 22,5                       | 5,5                            | 15,0                          |
| TA7                     | UTAP 18 a 24    | 1392                        | 35,0                       | 7,5                            | 30,0                          |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela 5.11** - Características energéticas dos ventiladores de extração no setor da misturação

| Ventiladores Extração | Zona Geral       | Zona Específica     | UTA's Associadas | Potência Ventilador (kW) |
|-----------------------|------------------|---------------------|------------------|--------------------------|
| <b>VEM.1</b>          | Misturação Velha | ML 00               | UTA 10           | SI                       |
| <b>VEM.2</b>          |                  | Piso 0              | UTA 11           | SI                       |
| <b>VEM.3</b>          |                  | Piso 0              | UTA 11           | SI                       |
| <b>VEM.4</b>          |                  | ML 06 e 07          | UTA 15           | 13,0                     |
| <b>VEM.5</b>          |                  | Piso 0 + 1          | UTA 6            | SI                       |
| <b>VEM.6</b>          |                  | Piso 1              | UTA 12 e UTA 14  | SI                       |
| <b>VEM.7</b>          |                  | ML 05               | UTA 13           | SI                       |
| <b>VEM.8</b>          |                  | ML 03 e 04          | UTA 13           | SI                       |
| <b>VEM.9</b>          |                  | ML 01 e 02          | UTA 9            | SI                       |
| <b>VEM.10</b>         | Misturação Nova  | ML 11               | UTA 22 / 23 / 24 | 26,4                     |
| <b>VEM.11</b>         |                  | ML 10               | UTA 22 / 23 / 24 | 26,4                     |
| <b>VEM.12</b>         |                  | Silos diários óleos | UTA 18           | SI                       |
| <b>VEM.13</b>         |                  | Armazém Reagentes   | UTA 21           | 9,0                      |
| <b>VEM.14</b>         |                  | Piso -1             | UTA 18           | SI                       |
| <b>VEM.15</b>         |                  | Armazém pigmentos   | UTA 21           | 9,0                      |
| <b>VEDM.1</b>         |                  | Piso 0              | UTA 22 / 23 / 24 | 11,0                     |
| <b>VEDM.2</b>         |                  | Piso 1              | UTA 19 / UTA 20  | 27,0                     |
| <b>VEDM.3</b>         |                  | Piso 0              | UTA 22 / 23 / 24 | 11,0                     |
| <b>VEDM.4</b>         |                  | Piso 1              | UTA 19 / UTA 20  | 27,0                     |

**Nota:** SI – Sem informação

A contabilização energética do consumo de energia elétrica referente às UTA's, torres de arrefecimento encontra-se agregada em Quadros Gerais de Ventilação (QGV), nomeadamente QGV3, QGV4 e QGV5 e o consumo dos ventiladores de desenfumagem encontra-se em Quadros Gerais de Desenfumagem (QGD).

Na **Tabela 5.12**, expõem-se assim os consumos de energia elétrica, em kWh e tep, e o respetivos custos referentes aos QGV's no setor da misturação durante o ano de 2022. O consumo do QGD1 não foi possível quantificar uma vez que não existe a sua monitorização.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela 5.12** - Consumo dos quadro gerais de ventilação, em kWh e tep, no setor da misturação no ano de 2022

| QGV  | Zona             | Consumo (kWh) | Consumo (tep) | Custo (€)  |
|------|------------------|---------------|---------------|------------|
| QGV3 | Misturação Velha | 2 778 500     | 597,4         | 669 473,24 |
| QGV4 |                  | 654 505       | 140,7         | 157 701,50 |
| QGV5 | Misturação Nova  | 819 649       | 176,2         | 197 492,53 |
| QGD1 | Misturação Nova  | -             | -             | -          |

Pelo facto de se apenas conhecer o consumo total de energia elétrica por QGV significa que não se conhece o consumo individualizado de cada equipamento nele apoiado. Desta forma, o cálculo da repartição dos consumos de energia elétrica pelos diversos equipamentos afetos à secção da ventilação foi efetuado admitindo-se a existência de proporcionalidade entre a potência instalada e os respetivos consumos contabilizados nos QGV's respetivos. Os exemplos de cálculo considerados para este efeito encontra-se no **Anexo B.9**.

Desta feita, na **Tabela 5.13** representam-se os consumos de energia elétrica, em kWh e tep, alocados a cada equipamento associado à secção da ventilação no setor da misturação durante o ano de 2022.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela 5.13** - Distribuição dos consumos de energia elétrica por tipo de equipamento de ventilação, em kWh e tep, no setor da misturação durante o ano de 2022

| Equipamento | QGV/QGD | % QGV/QGD | Consumo (kWh) | Consumo (tep) |
|-------------|---------|-----------|---------------|---------------|
| UTA 6       | QGV3    | 17,5%     | 486 000       | 104,5         |
| UTA 9       | QGV4    | 21,8%     | 142 560       | 30,7          |
| UTA 10      | QGV4    | 18,3%     | 119 880       | 25,8          |
| UTA 11      | QGV4    | -         | -             | -             |
| UTA 12      | QGV4    | -         | -             | -             |
| UTA 13      | QGV3    | 17,5%     | 486 000       | 104,5         |
| UTA 14      | QGV3    | 17,5%     | 486 000       | 104,5         |
| UTA 15      | QGV3    | 17,5%     | 486 000       | 104,5         |
| UTA 18      | QGV5    | 5,27%     | 43 200        | 9,3           |
| UTA 19      | QGV5    | 6,50%     | 53 280        | 11,5          |
| UTA 20      | QGV5    | 7,73%     | 63 360        | 13,6          |
| UTA 21      | QGV5    | 3,87%     | 31 680        | 6,8           |
| UTA 22      | QGV5    | 5,27%     | 43 200        | 9,3           |
| UTA 23      | QGV5    | 5,27%     | 43 200        | 9,3           |
| UTA 24      | QGV5    | 5,89%     | 48 252        | 10,4          |
| TA5         | QGV3    | 10,0%     | 278 640       | 59,9          |
| TA6         | QGV3    | 10,0%     | 278 640       | 59,9          |
| TA7         | QGV5    | 25,5%     | 208 800       | 44,9          |
| VEM.1       | QGV4    | -         | -             | -             |
| VEM.2       | QGV4    | -         | -             | -             |
| VEM.3       | QGV4    | -         | -             | -             |
| VEM.4       | QGV3    | 3,03%     | 84 240        | 18,1          |
| VEM.5       | QGV3    | -         | -             | -             |
| VEM.6       | QGV4    | -         | -             | -             |
| VEM.7       | QGV3    | -         | -             | -             |
| VEM.8       | QGV3    | -         | -             | -             |
| VEM.9       | QGV4    | -         | -             | -             |
| VEM.10      | QGV5    | 9,28%     | 76 032        | 16,3          |
| VEM.11      | QGV5    | 9,28%     | 76 032        | 16,3          |
| VEM.12      | QGV5    | -         | -             | -             |
| VEM.13      | QGV5    | 3,16%     | 25 920        | 5,6           |
| VEM.14      | QGV5    | -         | -             | -             |
| VEM.15      | QGV5    | 3,16%     | 25 920        | 5,6           |
| VEDM.1      | QGD1    | -         | -             | -             |
| VEDM.2      | QGD1    | -         | -             | -             |
| VEDM.3      | QGD1    | -         | -             | -             |
| VEDM.4      | QGD1    | -         | -             | -             |

### 5.2.2 Distribuição dos consumos de Vapor

O vapor que alimenta as baterias de aquecimento das UTA's da misturação velha provém de dois coletores (Coletor D e E). A partir do Coletor D realiza-se a alimentação do vapor saturado à pressão de 4,0 bar(a) às baterias de aquecimento das UTA's 13 a 15 enquanto que em relação às UTA's 9 a 12 e aos termoventiladores da misturação velha o vapor é proveniente do Coletor E. A pressão de saturação do vapor nas serpentinas dos termoventiladores é igual a 3 bar(a).

No caso dos termoventiladores na área de misturação nova o vapor é proveniente de linhas secundárias que derivam da linha de vapor que alimenta as calandras no setor da preparação a quente.

A distribuição dos consumos de vapor no setor da misturação foi conseguido efetuando-se balanços de energia às bateria de aquecimento e às serpentinas dos termoventiladores, tal como se apresenta na **Equação 5.1**.

$$\dot{q} = \dot{m}_{vapor} \times \Delta H_V \quad (5.1)$$

A partir da **Equação 5.1**, consegue-se retirar o caudal de vapor consumido pelas bateria de aquecimentos das UTA's ou pelas serpentinas dos termoventiladores tendo como conhecimento prévio a potência térmica transferida assim como o calor latente do vapor à respetiva pressão de saturação. O exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo B.9**.

Deste modo, na **Tabela 5.14** apresentam-se os consumos de vapor, em kg/h, característicos de cada UTA e termoventiladores.

Tabela 5.14 - Distribuição dos consumos de vapor por tipo de equipamento, em kg/h, no setor da misturação

| Coletor Vapor    | Equipamento                          | Pressão Saturação (Bar) | Potência Aquecimento (kW) | Calor latente (kJ/kg) | Caudal Vapor (kg/h) |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Coletor D</b> | UTAP 6                               | 4,0                     | 0,0                       | 2133,9 [24]           | 0                   |
|                  | UTAP 13                              | 4,0                     | 857                       |                       | 1446                |
|                  | UTAP 14                              | 4,0                     | 857                       |                       | 1446                |
|                  | UTAP 15                              | 4,0                     | 796                       |                       | 1343                |
| <b>Coletor E</b> | UTAP 9                               | 4,0                     | 430                       |                       | 725                 |
|                  | UTAP 10                              | 4,0                     | 430                       |                       | 725                 |
|                  | UTAP 11                              | 4,0                     | 430                       |                       | 725                 |
|                  | UTAP 12                              | 4,0                     | 550                       |                       | 928                 |
|                  | Termoventiladores (Misturação Velha) | 3,0                     | 242                       | 2163,9 [24]           | 403                 |
| <b>Total</b>     | -                                    | -                       | <b>4768</b>               |                       | <b>8034</b>         |

### 5.3 Cálculo e Análise do CEE de compostos de borracha

Na indústria de pneus, a receita de fabrico de um composto de borracha corresponde ao seu “ADN”, uma vez que é nela que se encontram codificados todos os “passos de mistura” que constituem a especificidade dos compostos.

Genericamente, os “passos de misturação” mais comuns envolvidos no processo de fabrico de compostos de borracha são:

- Masticação (M) – Redução da viscosidade do polímero;
- Master Batch (MB) – Redução da viscosidade do polímero e dispersão dos enchedores;
- Remill (R) – Redução da viscosidade do composto;
- Final Mix (FM) – Distribuição dos agentes vulcanizantes,
- One-Step Mixing (OSM) – Agregação dos “passos de misturação” delineados anteriormente para produzir um composto de borracha de forma contínua e consecutiva. Este tipo de produção só pode ser alcançada em misturadoras *Tandem*.

Torna-se então bastante óbvio que o consumo específico energia de compostos de borracha depende do tipo e da quantidade de “passos de misturação” envolvidos na sua produção além do tipo de misturadora envolvida no processo.

Posto isto, nesta secção apresenta-se o cálculo do CEE dos 5 principais compostos de borracha produzidos entre os dias 17 e 22 de junho de 2023, considerando-se todos os subprocessos a montante e a jusante do processo de misturação (linhas de misturação) e tendo em conta outros consumos de energia, tais como, climatização, ventilação, iluminação e de vapor (utilidades).

### 5.3.1 Cálculo do CEE – Top 5 compostos de borracha

O cálculo do CEE de compostos de borracha é uma tarefa complexa e bastante metódica, uma vez que implica saber com precisão a quantidade de energia consumida e a produção de um determinado composto em cada “*batch*”.

Na CMIP esta complexidade advém do facto de haver necessidade de existir a sobreposição da informação da energia consumida proveniente do *MessDas* e das informações dos compostos (produção, tempo por batch, passo de misturação, variedade, etc) provenientes do *MMS*. Atualmente, a informação relativa à energia consumida pelas linhas de misturação e da produção já se encontra agregada numa ferramenta denominada “*ProductProfiler*” instaurada pela Eng<sup>a</sup>. Fabienne Marwede do Departamento de Energia e Infraestruturas da Continental Mabor.

Pegando no trabalho realizado pela Eng<sup>a</sup>. Fabienne Marwede, extraiu-se a informação proveniente da ferramenta “*ProductProfiler*” durante os dias 17 e 22 junho de 2023 e procedeu-se ao cálculo do CEE dos 5 compostos mais produzidos durante esse intervalo de tempo. A ferramenta do “*ProductProfiler*” não apresenta contudo a informação da energia consumida relativamente às utilidades (ventilação, vapor, iluminação, etc). De modo a introduzir esse contributo no cálculo do CEE dos compostos de borracha referidos, calculou-se um CEE referente às utilidades, tendo-se determinado um valor igual a 94,5 kWh/ton. O cálculo encontra-se apresentado no **Anexo B10**. Assim, este valor foi somado aos CEE’s determinados através da ferramenta “*ProductProfiler*”, por forma a gerar um CEE global de cada composto de borracha.

Posto isto, na **Tabela 5.15** encontram-se representada a média dos CEE’s, em kWh/ton, determinados para cada composto considerado durante o período de 17 a 22 de

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

junho de 2023 bem como o valor do CEE médio ponderado. O exemplo de cálculo do CEE para um dos compostos considerados encontra-se no **Anexo B.10**.

**Tabela 5. 15** - CEE's dos 5 compostos mais produzidos entre 17 e 22 de junho de 2023 na CMIP

| Composto | Produção (ton) | Passo Misturação | Misturadoras            | CEE - ML (kWh/ton) | CEE Utilidades (kWh/ton) | CEE Total (kWh/ton) | CEE médio ponderado (kWh/ton) |
|----------|----------------|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| <b>A</b> | 275,26         | FMO              | ML11                    | 105,7              | 94,5                     | 200,2               | 262,8                         |
| <b>B</b> | 211,9          | M1+FMF           | ML12 + ML01             | 166,8              |                          | 261,2               |                               |
| <b>C</b> | 189            | M1+FMF           | ML02 + ML01             | 177,0              |                          | 271,5               |                               |
| <b>D</b> | 174,0          | PB+FMO           | ML11/ML12               | 178,0              |                          | 272,4               |                               |
| <b>E</b> | 164,7          | M1+R1+ FMF       | ML12 + ML12 + ML01/ML03 | 254,6              |                          | 349,1               |                               |

Pela **Tabela 5.15**, verifica-se que o composto A apresenta o menor consumo específico devido a ser produzido por um único passo de misturação (OSM) ao passo que os restantes apresentam pelo menos dois passos de misturação na sua receita. No extremo oposto encontra-se o composto E que, por virtude de necessitar de três passos de misturação o seu consumo específico ascende aos 349,1 kWh/ton, sendo o maior valor registado.

O CEE médio ponderado foi calculado com base na contribuição relativa da produção de cada composto face à produção total alcançada durante o mesmo período de tempo, tendo-se obtido um valor igual a 262,8 kWh/ton. O cálculo detalhado encontra-se no **Anexo B.10**.

## 6. Otimização Energética no Setor da Misturação

O presente capítulo permite expor e desenvolver um conjunto de medidas de otimização energética no setor da misturação com o objetivo último de reduzir o consumo energético atual neste setor e consequentemente uma redução do custo associado.

Por conseguinte, as medidas propostas de racionalização energética cujo desenvolvimento se apresentará nos subcapítulos seguintes são as seguintes:

- Avaliação da redução do CEE de compostos de borracha pertencentes à mesma família, através da modificação da metodologia de Master Batch + Final Mix (MB+FM) para OSM;
- Otimização de transformadores;
- Utilização do calor residual da corrente de condensados sujos para “descongelar” polímeros de borracha

Para a realização das análises económicas que acompanham as medidas de otimização apresentadas torna-se necessário conhecer o custo médio da energia elétrica e de vapor em vigor na CMIP.

Atualmente o custo médio da energia elétrica na CMIP é igual a 150 €/MWh. Todavia, a CMIP paga ainda de forma voluntária tranches devido à emissão de *Energy Attribute Certificates* (EAC's). Os EAC's são certificados onde se encontra a informação da produção, distribuição e consumo de energia elétrica renovável, permitindo assim que as empresas possam alegar que o seu consumo interno de energia elétrica provém de fonte renovável [25].

No presente momento, a CMIP apresenta um custo médio de emissão de EAC's de 6,80 €/MWh. Posto isto, o custo médio total de energia elétrica da CMIP situa-se nos 156,80 €/MWh. Relativamente ao vapor o custo médio atual para a CMIP situa-se nos 148,00 €/MWh.

## 6.1 Avaliação da redução do CEE de compostos de borracha – Master Batch + Final Mix vs OSM

Nesta secção pretende-se com um exemplo ilustrativo demonstrar qual das metodologias (MB+FM vs OSM) garante o menor custo específico energético de compostos de borracha pertencentes à mesma família (compostos de sílica).

Considere-se dois conjuntos de compostos de borracha, onde os compostos de sílica ora são produzidos em MB+FM ora são produzidos em OSM, estando os seus CEE's médios respetivos representados na **Tabela 6.1**. Para esta análise apenas se considerou os CEE's associados à energia consumida pelas linhas de misturação retirados da ferramenta “*ProductProfiler*”.

**Tabela 6.1** - Compostos de borracha produzidos por MB+FM e OSM

| Grupo | Compostos | CEE (kWh/ton) | $\Delta$ CEE (kWh/ton) | % Desvio |
|-------|-----------|---------------|------------------------|----------|
| 1     | MB+FM     | 233,5         | 97,0                   | 41,5%    |
| 2     | OSM       | 136,5         |                        |          |

Analisando a **Tabela 6.1**, torna-se notório que o CEE dos compostos de borracha referente ao grupo 2 é notoriamente inferior quando comparado ao CEE do grupo 1. Em termos quantitativos, a diferença no valor do CEE atinge os 97,0 kWh/ton que equivale a uma redução percentual de cerca 41,5%.

Sabendo que o custo médio da energia elétrica atual para a CMIP situa-se nos 156,80 €/MWh torna-se assim possível calcular o custo enefício da energia relativamente à produção em OSM e à produção em MB+FM, tal como se apresenta na **Tabela 6.2**. O cálculo encontra-se presente no **Anexo C.1**.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela 6.2** – Poupança por tonelada de compostos de borracha produzidos por MB+FM vs OSM

| Grupo | Composto | Custo ELE (€/kWh) | Custo (€/ton) | Redução Custo (€/ton) |
|-------|----------|-------------------|---------------|-----------------------|
| 1     | MB+FM    | 0,15680           | 36,6          | 15,2                  |
| 2     | OSM      |                   | 21,4          |                       |

Pela **Tabela 6.2**, observa-se que o custo por tonelada da produção em MB+FM é bastante superior que ao da produção em OSM, pelo que uma medida de otimização que poderá reduzir o custo total da energia elétrica necessária à produção destes compostos seria o aumento da produção em OSM em detrimento da produção MB+FM.

Em 2022, a produção dos grupos 1 e 2 de compostos de sílica em produção MB+FM foi igual a 325,7 ton e em OSM atingiu as 24,3 ton. Em relação ao valor da produção total (350 ton), a produção em MB+FM representa 93,1% e a produção em OSM os restantes 6,94%.

Admitindo que a produção dos compostos mencionados se manterá aproximadamente constante, desenvolveu-se um conjunto de cenários onde se propõe o aumento da produção em OSM face à produção em MB+FM permitindo determinar a poupança total, em euros, que se poderia atingir se esta medida fosse implementada. Os resultados obtidos relativamente ao processo de otimização referido encontram-se na **Tabela 6.3**. O exemplo de cálculo pode ser consultado no **Anexo C.1**.

**Tabela 6.3** - Otimização do custo da energia associado à produção de compostos de sílica MB+FM vs OSM

| % Produção MB+FM | % Produção OSM | Produção MB+FM (ton) | Produção OSM (ton) | Custo total MB+FM (€) | Custo total OSM (€) | Custo total antes otimização (€) | Custo total após otimização (€) | Poupança anual (€) |
|------------------|----------------|----------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 90%              | 10%            | 315,0                | 35,0               | 11 530,48             | 749,07              | 12 442,61                        | 12 279,55                       | 163,06             |
| 80%              | 20%            | 280,0                | 70,0               | 10 249,31             | 1 498,14            |                                  | 11 747,45                       | 695,16             |
| 70%              | 30%            | 245,0                | 105,0              | 8 968,15              | 2 247,21            |                                  | 11 215,36                       | 1 227,25           |
| 60%              | 40%            | 210,0                | 140,0              | 7 686,98              | 2 996,28            |                                  | 10 683,27                       | 1 759,34           |
| 50%              | 50%            | 175,0                | 175,0              | 6 405,82              | 3 745,35            |                                  | 10 151,18                       | 2 291,44           |

Pela análise da **Tabela 6.3** é possível constatar que quanto maior for o aumento da produção em OSM face à produção MB+FM maior será a poupança anual alcançada, atingido a máxima poupança, neste cenário, quando a produção é equivalente (50% MB+FM / 50% OSM).

Além da poupança relacionada com o custo da energia elétrica, a medida apresentada permitirá ainda reduzir os tempos de produção dos compostos, uma vez que a produção OSM permite a fabricação do composto em um único “passo de misturação”.

Contudo, na prática, esta mudança implicará necessariamente constrangimentos ao nível do planeamento da produção, pelo que, de modo a apresentar uma medida de otimização mais robusta é imprescindível haver uma coordenação com o DEI (Departamento de Engenharia e Gestão Industrial) por forma a encontrar a melhor solução possível.

## 6.2 Otimização de Transformadores

A secção seguinte encontra-se dividida em dois tópicos:

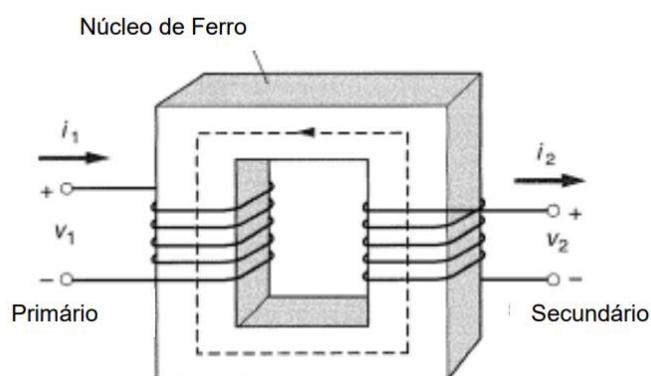
- **6.2.1** –Faz-se uma breve abordagem sobre o princípio de funcionamento dos transformadores, a sua utilidade e as perdas de energia elétrica associadas.
- **6.2.2** - Apresentam-se medidas que visam diminuir as referidas perdas de energia num conjunto de transformadores situados no setor da misturação.

### 6.2.1 Transformadores Elétricos

Um transformador elétrico é uma máquina utilizada para aumentar ou diminuir tensões e/ou correntes elétricas. Opera somente com corrente elétrica alternada (CA), ou seja, a sua intensidade e direção variam periodicamente [26].

O princípio de funcionamento de um transformador baseia-se na Lei de Faraday ou Lei da indução eletromagnética, onde a variação do fluxo magnético que atravessa um dado circuito produz uma tensão dando origem a corrente elétrica [27].

A estrutura de um transformador elétrico consiste em dois enrolamentos (primário e secundário) que se encontram envoltos num núcleo ferromagnético. Quando uma corrente elétrica atrevesse um dos enrolamentos origina um campo magnético que é transmitido ao longo do núcleo metálico. O campo magnético provoca uma variação do fluxo magnético do outro enrolamento surgindo assim uma corrente elétrica induzida e uma tensão compatível com a dimensão desse enrolamento. Os enrolamentos primários e secundários são também designados por bobina primária e secundária. A bobina primária recebe a tensão da rede elétrica ao passo que a bobina secundária disponibiliza a tensão regulada para um determinado equipamento. Na **Figura 6.1** encontra-se representado esquematicamente um transformador elétrico [26, 27].



**Figura 6.1** - Transformador elétrico [27]

O número de espiras que o enrolamento secundário deverá possuir para garantir a tensão regulada necessária está diretamente relacionada pela força eletromotriz induzida no circuito secundário [27].

Existem diversos tipos de transformadores tendo em conta a sua finalidade de aplicação, desde a Baixa Tensão (BT) até à Alta Tensão (AT) podendo ser monofásicos ou trifásicos. No nível de BT os transformadores utilizados servem para reduzir a tensão na ordem dos 230V/420V para 110V ou porventura para tensões inferiores [27].

Na passagem de Média Tensão (MT) para BT encontram-se os transformadores de distribuição, normalmente trifásicos, reduzindo a tensão entre 30 kV a 15 kV para 420 V. Estruturalmente, este tipo de transformadores podem ser imersos em óleo ou de resina (tipo seco). Será sobre os transformadores de distribuição de tipo seco que a **secção 6.1**

se irá incidir. Na **Figura 6.2** encontra-se representado um transformador de distribuição do tipo seco [27].



**Figura 6.2** - Transformador de distribuição do tipo seco [27]

Finalmente, quando se pretende reduzir a tensão de AT para MT encontramos-nos na presença de transformadores de potência. Estes transformadores são apenas fabricados por encomenda e de acordo com as características requeridas pelo comprador.

- Perdas em Transformadores

Se um dado transformador for ideal, isto é, não existirem perdas de energia elétrica, os ângulos de fase da tensão ( $\theta_v$ ) e da corrente ( $\theta_i$ ) da bobina primária ( $P$ ) são iguais aos da bobina secundária ( $S$ ). Assim, pode-se escrever que a potência ativa fornecida pelo primário é igual à potência ativa absorvida pelo secundário (**Equação 6.1**) [28]:

$$P. Ativa_p = P. Ativa_s \leftrightarrow U_p i_p \cos \theta = U_s i_s \cos \theta \quad (6.1)$$

Todavia, os transformadores reais apresentam perdas de energia elétrica tanto ao nível do núcleo ferromagnético, designadas perdas em vazio ou no ferro como ao nível dos enrolamentos, denominadas por perdas em carga ou no cobre. Assim, a perda de energia elétrica total nos transformadores compreende as contribuições dos dois tipos de perdas mencionadas sendo traduzidas matematicamente pela **Equação 6.2** [29].

$$P_{perdas}(kW) = P_{Fe} + P_{Cu} \quad (6.3)$$

Existem diversos métodos para estimar as perdas de energia elétrica num dado transformador. Um dos métodos mais usuais é baseado no diagrama de cargas do transformador [29].

O fator de carga de um transformador pode ser definido pelo quociente entre a potência relativa a um dado momento ( $P_t$ ) pela potência nominal do transformador ( $P_{nominal}$ ) (**Equação 6.3**) [29].

$$K = \frac{P_t}{P_{nominal}} \quad (6.3)$$

As perdas no ferro são independentes da carga do transformador ao passo que as perdas no cobre são proporcionais ao quadrado da carga.

Assim, pode-se calcular as perdas totais de um transformador, em kW, segundo a **Equação 6.4** [29]:

$$P_{perdas}(kW) = P_{Fe} + \sum K(t)^2 \times P_{Cu} \quad (6.4)$$

Como aproximação, se se considerar um valor do fator de carga médio do transformador durante o intervalo de tempo de funcionamento considerado, pode-se simplificar a **Equação 6.4** originando-se assim a **Equação 6.5**.

$$P_{perdas}(kW) = P_{Fe} + K_{médio}^2 \times P_{Cu} \quad (6.5)$$

Na avaliação de investimentos é comum realizar-se análise do Custo Total do Equipamento (TCO – *Total Cost of Ownership*) quando se pretende comparar dois ou mais transformadores. O TCO além de considerar o custo de aquisição contempla igualmente os custos que se irão gerar devido às perdas de energia durante o tempo de vida do transformador. Posto isto, a expressão alusiva ao cálculo do TCO encontra-se representada na **Equação 6.6** [30].

$$TCO(€) = I + (P_{Fe} + K_{médio}^2 \times P_{Cu}) \times B \times 8760 \times Custo_{ELE} \quad (6.6)$$

O fator  $A$  diz respeito à parcela da capitalização composta do custo da energia elétrica ao longo do tempo de vida do transformador, tal como se pode verificar pela **Equação 6.7** [30].

$$B = \frac{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^n}{i} \quad (6.7)$$

### 6.2.2 Medidas de mitigação das perdas de transformadores no setor da misturação

O fornecimento de energia elétrica à CMIP inicia-se por uma linha aérea de 60 kV pertencente à empresa EDP Distribuição, sendo recebida numa subestação com uma potência instalada de 50 MVA. A subestação contém dois transformadores de 60 kV/15 kV, tendo cada um uma potência nominal de 25 MVA.

A partir da subestação, a saída de 15 kV é distribuída por 13 postos de transformação (PT's) fornecendo aos QGBT's (Quadros Gerais de Baixa Tensão) das diversas instalações diferentes níveis de Baixa Tensão : 300 V, 1155 V, 720 V e 400 V. Na **Figura 6.3**, encontra-se representada esquematicamente a implantação dos PT's na CMIP.

Auditoria Energética ao Processo de Misturação

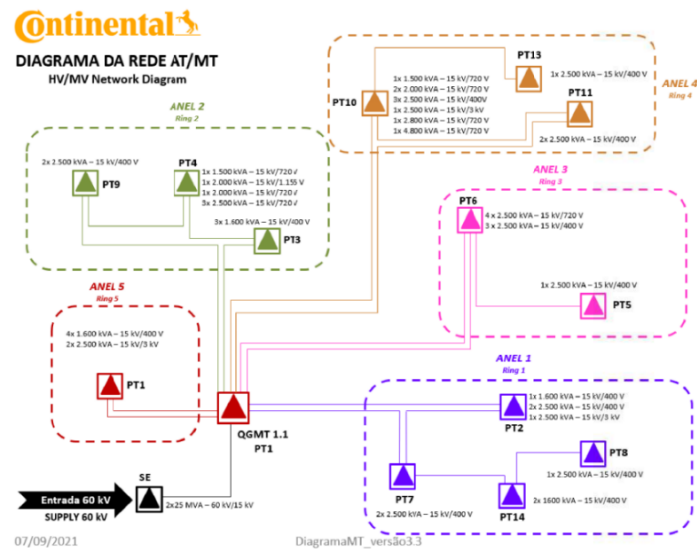


Figura 6.3 - Implantação dos PT's na CMIP

De forma a dar início à análise de otimização, identificaram-se alguns transformadores que se encontram alocados ao setor de misturação, através da seleção dos transformadores que possuem na sua maioria equipamentos da misturação neles apoiados. Os transformadores identificados bem como as suas características encontram-se na **Tabela 6.4**.

Tabela 6.4 - Transformadores selecionados para otimização no setor da misturação

| Postos de Transformação (PT's) | Tipo | Fabricante     | Potência Nominal (kVA) |
|--------------------------------|------|----------------|------------------------|
| PT2                            |      |                |                        |
| Transformador 2.2              | seco | FfranceTransfo | 2500                   |
| Transformador 2.3              | seco | FfranceTransfo | 2500                   |
| PT3                            |      |                |                        |
| Transformador 3.1              | seco | FfranceTransfo | 1600                   |
| Transformador 3.2              | seco | FfranceTransfo | 1600                   |
| Transformador 3.3              | seco | FfranceTransfo | 1600                   |
| PT6                            |      |                |                        |
| Transformador 6.2              | seco | FfranceTransfo | 2500                   |
| Transformador 6.3              | seco | FfranceTransfo | 2500                   |
| PT10                           |      |                |                        |
| Transformador 10.1             | seco | EFACEC         | 2500                   |
| Transformador 10.2             | seco | EFACEC         | 2500                   |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Seguidamente, recorrendo ao *MessDas*, recolheu-se os diagramas de carga de cada um dos transformadores representados durante o ano de 2022 com a melhor resolução possível (15 min).

Com base nos diagramas de carga foi possível determinar a potência elétrica média de cada transformador como também o pico máximo de potência para o intervalo de tempo considerado. A partir dos valores da potência média e da potência nominal foi possível igualmente determinar o fator de carga médio de cada transformador, recorrendo-se para isso à **Equação 6.3**.

Os resultados obtidos encontram-se na **Tabela 6.5** e o respetivo exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo C.2**.

**Tabela 6.5** - Potência média e máxima, em kW, e fator de carga (%) dos transformadores no setor da misturação

| Postos de Transformação (PT's) | Potência média (kW) | Potência máxima (kW) | Fator de Carga (%) |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| <b>PT2</b>                     |                     |                      |                    |
| <b>Transformador 2.2</b>       | 710                 | 1242                 | 28,4%              |
| <b>Transformador 2.3</b>       | 569                 | 959                  | 22,8%              |
| <b>PT3</b>                     |                     |                      |                    |
| <b>Transformador 3.1</b>       | 406                 | 496                  | 25,4%              |
| <b>Transformador 3.2</b>       | 310                 | 452                  | 19,4%              |
| <b>Transformador 3.3</b>       | 333                 | 416                  | 20,8%              |
| <b>PT6</b>                     |                     |                      |                    |
| <b>Transformador 6.2</b>       | 541                 | 693                  | 21,6%              |
| <b>Transformador 6.3</b>       | 846                 | 1029                 | 33,8%              |
| <b>PT10</b>                    |                     |                      |                    |
| <b>Transformador 10.1</b>      | 606                 | 949                  | 24,2%              |
| <b>Transformador 10.2</b>      | 617                 | 1150                 | 24,7%              |

Observando a **Tabela 6.5**, verifica-se que os fatores de carga para todos os transformadores são reduzidos. O fator de carga é um parâmetro importante na análise de transformadores uma vez que permite quantificar a eficiência do consumo de energia elétrica, ou seja, quanto mais próximo este valor estiver de 100% melhor será aproveitamento da energia elétrica da instalação. Pode-se então referir que os transformadores apresentados na **Tabela 6.5** encontram-se francamente sobredimensionados.

Verificada esta situação, as medidas que se estudaram e que a seguir se apresentam para mitigar as perdas de energia elétrica atuais nos transformadores foram:

- **1** - Desligar transformadores que se encontram ligados em paralelo de modo a reduzir o custo relacionado com as perdas de energia elétrica, através da redução das perdas em vazio;
- **2** - Substituição dos transformadores 10.1 e 10.2 de 2500 kVA por transformadores de 1600 kVA.

- **Medida 1**

Os transformadores que se pretendem aglutinar são os Transformadores 2.2 e 2.3, Transformadores 3.1 e 3.3 e os Transformadores 10.1 e 10.2. Esta aglutinação dos consumidores dos referidos transformadores levará necessariamente ao aumento do fator de carga médio do transformador que não se desativa e consequentemente ao aumento das perdas em carga. No entanto, verificou-se que em relação às perdas totais a redução das perdas em vazio compensam o aumento das perdas em carga, tal como se pode constatar na **Tabela 6.6**. Os respetivos exemplos de cálculo encontram-se apresentados no **Anexo C.2**.

**Tabela 6.6** - Otimização energética de transformadores no setor da misturação

| PT        | Transformador | Potência Perdas antes Otimização (kW) | Fator de Carga após Otimização (%) | Potência Perdas após Otimização (kW) |
|-----------|---------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>2</b>  | 2.2+2.3       | 8,10                                  | 51,9%                              | 7,90                                 |
| <b>3</b>  | 3.1+3.3       | 5,36                                  | 43,1%                              | 4,40                                 |
| <b>6</b>  | 6.1+6.2       | 8,40                                  | 34,8%                              | 5,09                                 |
| <b>10</b> | 10.1+10.2     | 12,27                                 | 49,6%                              | 9,67                                 |

Finalmente, na **Tabela 6.7** encontram-se representados os custos associado às perdas de energia elétrica nos transformadores considerados antes e após a otimização, permitindo determinar a poupança projetada se existisse a implementação da medida apresentada. O exemplo de cálculo encontra-se no **Anexo C.2**.

**Tabela 6.7** - Poupança anual da otimização de transformadores no setor da misturação

| PT           | Transformador | Custo anual Perdas antes Otimização (€) | Custo anual Perdas após Otimização (€) | Poupança Anual (€) |
|--------------|---------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| 2            | 2.2+2.3       | 11 121,36                               | 10 852,97                              | 268,39             |
| 3            | 3.1+3.3       | 7 362,55                                | 6 044,17                               | 1 318,39           |
| 6            | 6.1+6.2       | 11 543,61                               | 6 986,91                               | 4 556,71           |
| 10           | 10.1+10.2     | 16 858,75                               | 13 282,87                              | 3 575,88           |
| <b>Total</b> | -             | <b>46 886,28</b>                        | <b>37 166,92</b>                       | <b>9 719,36</b>    |

Observando a **Tabela 6.7**, verifica-se que na globalidade a otimização dos transformadores no setor da misturação permite uma poupança anual de 9 719,36 €, com a maior contribuição proveniente da aglutinação dos transformadores 6.1 e 6.2 (4 556,71€).

### • Medida 2

Da **Tabela 6.6**, verifica-se que a maior potência de perdas de energia elétrica é proveniente dos transformadores 10.1 e 10.2 (12,27 kW). Com base nesta evidência, optou-se por realizar um estudo para avaliar se seria economicamente viável a sua substituição por transformadores que possuam uma potência nominal inferior.

Analisando a **Tabela 6.5**, observa-se que a potência máxima registada, em 2022, para os transformadores 10.1 e 10.2 foi igual a 949 e 1150 kW, respetivamente. Sendo comum ao nível da prática industrial dimensionar transformadores de modo a que a potência máxima nunca atinja acima de 80% (fator de demanda) da sua potência nominal, optou-se por considerar que o valor mínimo da potência nominal que devem ter os novos transformadores para substituir os atuais transformadores 10.1 e 10.2 de 2500 kVA fosse de 1600 kVA. O processo de cálculo efetuado de modo a chegar à conclusão aqui apresentada encontra-se no **Anexo C.3**.

Os dois novos transformadores de 1600 kVA selecionados serão idênticos sendo fabricados e comercializados pela Schneider Eletric pertencentes ao modelo *Trihal dry-*

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

type. A ficha de produto destes transformadores, onde se encontram descritas as suas características técnicas, está presente no **Anexo C.3**. O custo de aquisição de cada transformador situa-se nos 78 580,00 €, pelo que o custo total dos dois transformadores ascende aos 157 160,00 €.

De modo a verificar se é viável a substituição dos transformadores 10.1 e 10.2 realizou-se uma análise económica, estando apresentada de forma resumida na **Tabela 6.8**. O respetivo processo de cálculo encontra-se no **Anexo C.3**.

**Tabela 6.8** - Análise económica - Substituição dos transformadores 10.1 e 10.2 (2500 kVA) por transformadores de 1600 kVA

|                                                 |                  |
|-------------------------------------------------|------------------|
| <b>Investimento Total</b>                       | 157 160,00 €     |
| <b>Custo Perdas - 2500 kVA</b>                  | 275 664,74 €     |
| <b>Custo Perdas - 1600 kVA</b>                  | 238 661,52 €     |
| <b>Poupança</b>                                 | 37 003,22 €      |
| <b>Período de Retorno do Investimento (PRI)</b> | <b>4,25 anos</b> |

Pela análise da **Tabela 6.8**, a substituição dos transformadores 10.1 e 10.2 por dois transformadores de 1600 kVA garante uma poupança relacionada com as perdas de energia elétrica iguais a cerca de 37 000 €.

Através do cálculo do período de retorno do investimento (PRI) é possível avaliar se o projeto efetuado é ou não rentável sob o ponto de vista económico. Na Continental Mabor só se aceitam viáveis os projetos de investimento na área energética que apresentem um valor do PRI igual ou inferior a 5 anos. Como o PRI para o projeto apresentado situa-se em torno dos 4 anos, pode-se então afirmar que se trata de um projeto economicamente rentável a curto prazo.

### 6.3 Utilização do calor residual da corrente de condensados sujos para o descongelamento de polímeros de borracha

O fenómeno de “congelamento” de borracha diz respeito ao processo exotérmico onde as cadeias de hidrocarbonetos transitam para uma conformação cristalina. A cristalização de polímeros de borracha inicia-se a temperaturas próximas da ambiente, agravando-se

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

para temperaturas sucessivamente inferiores até atingir a temperatura de transição vítrea, sendo que nesse caso toda a estrutura polimérica da borracha se encontra cristalizada [31].

A borracha que é utilizada na Continental Mabor chega à fábrica em paletes do tipo GoodPack™, proveniente de navios cargueiros oriundos de países como Tailândia e Indonésia. Devido ao ambiente tropical destes países não seria de todo esperado que a borracha chegasse congelada até às instalações fabris. Todavia, os navios cargueiros, ao longo do seu trajeto, passam por portos norte-americanos e do norte da Europa onde, especialmente durante a temporada de inverno, podem ser atingidas temperaturas negativas originando o fenómeno de congelamento da borracha.

O mecanismo de congelamento inicia-se do exterior para o interior da paleta (direção contrária ao fluxo de calor), pelo que as superfícies mais exteriores congelam primeiro e ao longo do tempo as superfícies mais interiores congelam igualmente. No entanto, este mecanismo é relativamente lento, pelo que o congelamento da borracha no interior da paleta será maioritariamente parcial e será mais ou menos extenso conforme as condições ambientais a que estiver sujeita [31].

O congelamento da borracha no interior das paletes constitui um dos maiores constrangimentos na indústria de pneus com efeitos notórios no aumento do consumo de energia elétrica no setor da misturação, uma vez que, provoca, aquando do processo de obtenção do composto, o aumento do tempo de mistura em comparação com o estipulado pela receita como também o aumento dos picos de potência elétrica que o misturador necessita para efetuar o processo de mistura [31].

Outra preocupação, mas não menos importante, está relacionada com a manutenção dos misturadores. Os polímeros de borracha congelada obrigam à exercício de um torque mais elevado por parte dos rotores o que introduz um stress maior na máquina e, por consequência, leva a um menor tempo de vida útil desta, podendo até, em situações limite levar à sua danificação [31].

Felizmente, o processo de congelamento da borracha pode ser revertido através do aquecimento dos polímeros de borracha o que promove uma maior fluidez e elasticidade do material [31].

Atualmente existe na CMIP uma área dedicada ao descongelamento da borracha através da insuflação de ar quente proveniente da permuta de calor na serpentina de um

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

termoventilador alimentado com vapor saturado proveniente da central térmica. Esta situação, no entanto, encontra-se longe da ideal uma vez que o local onde se encontram as paletes não é de todo apropriado para o efeito já que carece de isolamento térmico adequado e além disso a posição do termoventilador impede uma boa distribuição do ar pelo espaço ocupado pelas paletes. Outro motivo desfavorável ao sistema implementado refere-se ao uso de vapor saturado como fonte quente para o funcionamento do termoventilador. Esta é uma forma de energia muito dispendiosa atualmente que incorre em elevados custos operacionais referentes ao termoventilador mencionado, podendo atingir cerca de 37 000 € por ano.

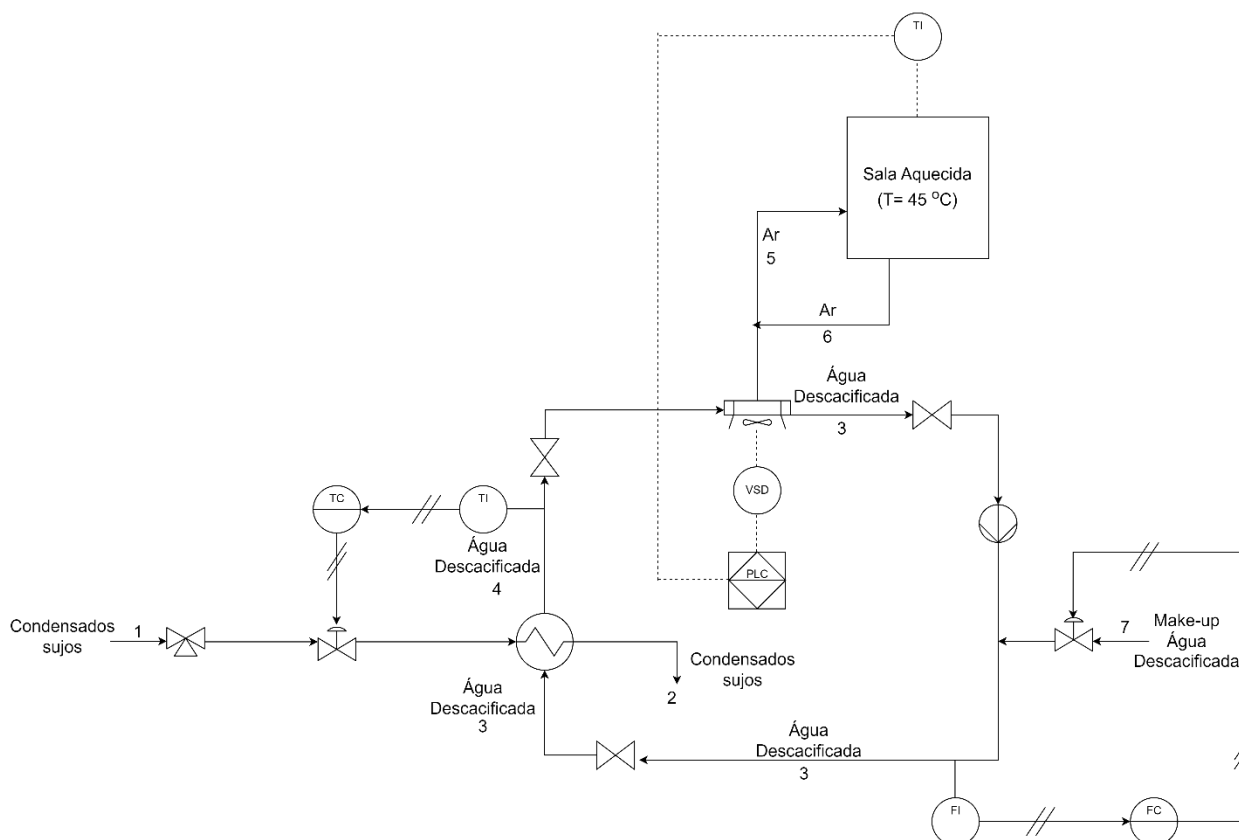
Face a esta problemática, decidiu-se investigar soluções energeticamente mais favoráveis e consequentemente mais económicas em relação à situação atual.

Após a ponderação de várias alternativas pensou-se em aproveitar o calor residual da corrente de condensados sujos provenientes da condensação de vapor saturado nas prensas de vulcanização.

**Na Figura 6.4,** ilustra-se o processo idealizado através de um diagrama P&ID.

A corrente de condensados (1) é usada num permutador de calor para pré-aquecer uma corrente de água descalcificada (3). Esta água circula em circuito fechado, permitindo o aquecimento de uma corrente de ar que circula num termoventilador (5). O ar quente é então insuflado numa sala termicamente adequada para o processo de descongelamento da borracha. Definiu-se que a temperatura da sala deveria ser igual a 45 °C. De modo a tornar o processo mais eficiente estipulou-se que se procede igualmente à recirculação da corrente de ar (6).

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação


**Figura 6.4** - Diagrama P&ID - Aproveitamento de calor dos condensados sujos para descongelamento de borracha

O facto de não se utilizar diretamente a corrente de condensados sujos no termoventilador deriva, obviamente, da sujidade que esta corrente contém, nomeadamente lamas (borras castanhas gordurosas) e pequenos pedaços de borracha, que poderiam por em causa a transferência do calor necessário ao processo. Este aproveitamento permite ainda reduzir a temperatura de descarga dos condensados sujos para o esgoto, racionalizando-se assim o desperdício de energia térmica. Na **Tabela 6.9**, encontram-se representadas as características relevantes relativamente à corrente de condensados sujos.

**Tabela 6.9** - Características da corrente de condensados sujos

| Condensados sujos            |                        |
|------------------------------|------------------------|
| <b>Temperatura (Inverno)</b> | 78 °C                  |
| <b>Caudal volumétrico</b>    | 6,77 m <sup>3</sup> /h |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Na **Tabela 6.9** apenas se apresenta a temperatura dos condensados sujos para a época de inverno uma vez que esta é a situação mais desfavorável relativamente à temperatura desta corrente.

A capacidade da sala aquecida foi determinada com base nas toneladas de borracha que o setor da misturação necessita por dia e as dimensões externas que cada paleta GoodPack™ possui (1,465 m x 1,150 m x 1,098 m – C x L x h) [32]. Em média, a CMIP processa, por dia, 100 toneladas de borracha e sabendo que cada uma contém no seu interior 1,65 toneladas de borracha, o número de paletes diários é de 61 [32]. Na **Figura 6.5** encontra-se uma imagem de uma paleta GoodPack™.



**Figura 6.5** - Pallet GoodPack™ [32]

Assim, o volume da sala aquecida ascende a 420 m<sup>3</sup> (12 m x 7 m x 5 m – C x L x h) onde se teve em conta a aplicação de um fator de não ocupação de 25%, por forma a contabilizar a facilidade de acesso para remoção e inserção das paletes dentro da sala. O processo detalhado de cálculo encontra-se no **Anexo C.4**.

As necessidades térmicas da sala aquecida (**Equação 6.8**) foram determinadas tendo-se em conta a potência térmica necessária para aquecer a borracha como também a potência correspondente às perdas térmicas inerentes pela envolvente.

$$\dot{q}_{sala\ aquecida} = \dot{q}_{borracha} + \dot{q}_{perdas} \quad (6.8)$$

A potência térmica da borracha (**Equação 6.9**) foi determinada tendo em conta que a temperatura mínima de alimentação aos misturadores deve ser igual a 15 °C ( $T_f$ ) partindo-se de uma situação em que o centro da paleta se encontra a -10 °C ( $T_i$ ).

$$\dot{q}_{borracha} = \dot{m}_{borracha} \times C_{p_{borracha}} \times (T_f - T_i) \quad (6.9)$$

Assim, e tendo em conta novamente que a CMIP processa 100 toneladas por dia de borracha, a potência térmica necessária para efetuar o aquecimento entre as temperaturas mencionadas é igual a 13 kW. No **Anexo C.4**, encontra-se a apresentação do cálculo efetuado.

A potência correspondente às perdas térmicas foram estimadas através da aplicação **Equação 6.10**, onde se consideraram as resistências à transferência de calor tanto por condução através das paredes como também por fenómenos de convecção no interior e exterior da sala. O processo detalhado de cálculo encontra-se no **Anexo C.4**.

$$\dot{q}_{perdas} = A_{total\ sala} \times \frac{T_{sala} - T_{\infty}}{(R_{Si} + R_{cond} + R_{Se})} \quad (6.10)$$

Para as resistências de convecção interior e exterior e de condução admitiram-se valores de referência previstos na análise térmica de edifícios resistências pelo que o valor destas resistências são iguais a 0,13, 0,04 e 0,49 m<sup>2</sup>.K/W, respetivamente [33].

Por precaução, o cálculo da potência térmica das perdas baseou-se no pior cenário possível, correspondente à época de inverno. Posto isto, considerou-se uma temperatura do ar exterior ( $T_{\infty}$ ) igual a 5 °C.

A área total da sala corresponde ao somatório das áreas de superfícies que a constituem, apresentando um valor igual a 274 m<sup>2</sup>.

Assim e a partir da informação recolhida, estimou-se que as perdas térmicas que podem ocorrer na sala aquecida que alberga a borracha congelada igualam 16,6 kW.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Somando este valor à potência térmica necessária para descongelar a borracha, verifica-se que a sala aquecida necessita de uma potência térmica de 29,6 kW, para garantir a viabilidade do processo de acordo com as especificações térmicas apresentadas.

Como se pretende aproveitar o calor residual dos condensados sujos para o processo de descongelamento da borracha, significa que a necessidade térmica da sala aquecida tem que ser suprida pela variação de entalpia que os condensados sujos sofrem no permutador de calor (**Equação 6.11**). O cálculo em detalhe encontra-se no **Anexo C.4**.

$$\dot{q}_{\text{condensados sujos}} \geq \dot{q}_{\text{sala aquecida}} \quad (6.11)$$

Considerando-se uma variação de temperatura dos condensados de 10 °C, a potência térmica fornecida por estes à água descalcificada no permutador de calor ascende aos 78,6 kW. Sendo este valor superior a 29,6 kW significa que a necessidade térmica da sala aquecida fica assegurada, garantindo-se assim a viabilidade energética do projeto em questão.

Verificada a viabilidade energética do projeto, torna-se necessário avaliá-lo sob o ponto de vista económico. O investimento necessário à implementação do projeto passa principalmente, pela aquisição do permutador de calor condensados sujos/água descalcificada e um termoventilador que tenham a capacidade de transferir a potência térmica necessária ao processo.

Relativamente ao permutador de calor, na **Tabela 6.10** apresentam-se as características relativamente à corrente de água descalcifica que nele circula.

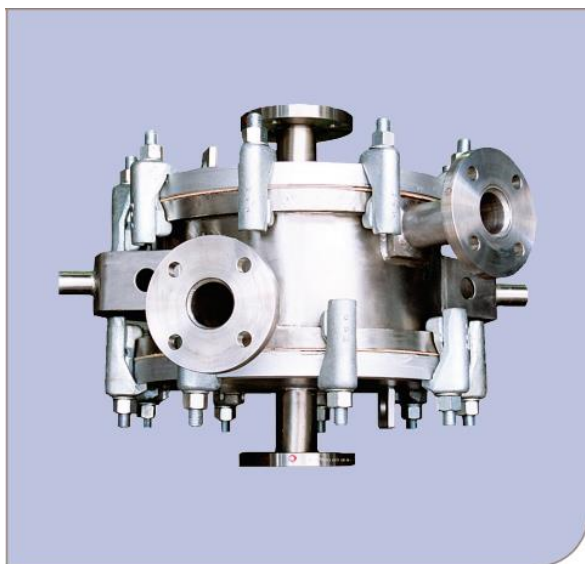
**Tabela 6.10** - Características da corrente de água descalcificada

| Água Descalcificada |                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------|
| Temperatura entrada | 20 °C                                           |
| Caudal volumétrico  | 1,80 m <sup>3</sup> /h ( <b>Ver Anexo C.4</b> ) |

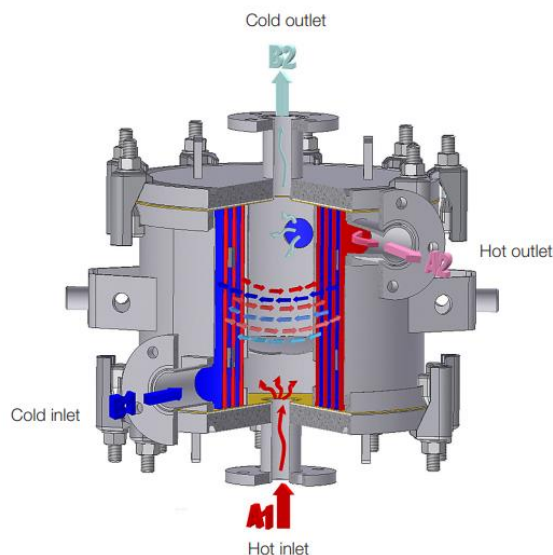
Partindo das características dos dois fluidos, contactou-se a empresa Alfa Laval para a realização do projeto e respetivo orçamento do permutador de calor em questão. O equipamento proposto pela Alfa Laval consiste num permutador de calor em espiral do

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

modelo ALSHE LTL 4L™. Nas **Figuras 6.6 e 6.7**, encontra-se uma imagem do permutador em espiral ALSHE LTL 4L™ e um esquema ilustrativo do princípio de funcionamento do mesmo, respetivamente.



ALSHE LTL

**Figura 6.7** - Permutador de calor em espiral Alfa Laval ALSHE LTL 4L™ [34]**Figura 6.6** - Esquema ilustrativo do permutador de calor em espiral Alfa Laval ALSHE LTL 4L™ [34]

O permutador de calor ALSHE LTL 4L™ é constituído por dois canais concêntricos providenciando um escoamento em contracorrente pura ideal para a recuperação de calor [34]. Pela **Figura 6.7**, verifica-se que o fluido quente entra no centro do permutador saindo pela periferia deste e o fluido frio escoar no sentido contrário. O *design* deste permutador em espiral permite reduzir drasticamente efeitos negativos relacionados com o sujamento devido à elevada velocidade com que os fluidos circulam nos canais. Deste modo promovem uma capacidade de auto-limpeza sendo por isso ideais para este projeto devido à natureza da corrente de condensados sujos [34]. O dimensionamento detalhado do permutador ALSHE LTL 4L™ encontra-se no **Anexo C.4**. O custo associado à aquisição do permutador referido situa-se nos 12 510,00 €.

De forma similar à seleção do permutador de calor, contactou-se a empresa Franco SRL para a seleção de um termoventilador adequado às necessidades térmicas do processo. Considerando a potência térmica recebida pela água descalcificada no permutador de calor de cerca de 79 kW foi selecionado o modelo AP80 conseguindo

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

transferir uma potência térmica de 81 kW e com um caudal de ar circulante de 5000 m<sup>3</sup>/h. Na **Figura 6.8**, encontra-se uma imagem do termoventilador AP80. As características do termoventilador AP80 encontram-se no **Anexo C.4**.



**Figura 6.8** - Termoventilador Franco SRL - AP80 [41]

Associado ao termoventilador pediu-se também para incluir um difusor de fluxo para garantir uma boa distribuição do ar quente pela sala e um suporte. O custo associado ao conjunto termoventilador+difusor+suporte ascende aos 2921,00 €.

A avaliação da viabilidade económica do projeto apresentado verifica-se, mais uma vez, através do cálculo do PRI. Na **Tabela 6.11**, apresentam-se os valores referentes ao investimento e à poupança assim como o valor PRI.

**Tabela 6.11** - Análise Económica - Aproveitamento dos condensados sujos para o descongelamento de borracha

|                                                 |                  |
|-------------------------------------------------|------------------|
| <b>Investimento Total</b>                       | 15 431,00 €      |
| <b>Poupança anual</b>                           | 36 900,46 €      |
| <b>Período de Retorno do Investimento (PRI)</b> | <b>0,42 anos</b> |

Em termos globais, o investimento necessário soma 15 431,00 €, e a poupança obtida é obtida pela desativação do consumo de vapor na situação atual (36 900,46 €).

Assim, o valor do PRI situa-se em 0,42 anos (aproximadamente 5 meses), pelo que se pode concluir que o projeto apresentado é viável a curto prazo (PRI <5 anos) e o tempo recuperação do capital investido apresenta um intervalo bastante reduzido, sendo bastante

vantajoso em termos económicos. O cálculo dos valores de investimento total, poupança anual e PRI encontram-se **Anexo C.4**.

O maior constrangimento do projeto apresentado é a localização da sala aquecida com as dimensões pretendidas. A corrente de condensados sujos é originária da vulcanização pelo que a implementação prática do sistema proposto necessitaria que o espaço destinado ao descongelamento da borracha se encontrasse relativamente perto do local referido. Uma possibilidade seria utilizar espaço na zona de *scrap* de pneus presente na área da inspeção final uma vez que se encontra perto da área da vulcanização e confirmou-se que existe espaço suficiente para acomodar a quantidade de borracha congelada pretendida.

Outra preocupação é o eventual consumo extra de gás natural para aquecer água para banhos nos balneários visto que a corrente de condensados sujos já se encontra a ser utilizada para aquecer essa água.

Assim sendo e tendo em conta os constrangimentos referidos deve-se tentar procurar entender o impacto que eles apresentam na viabilidade do projeto delineado nesta secção.

## 7. Conclusões

Através da realização da presente dissertação foi possível responder positivamente aos principais objetivos da realização de uma auditoria energética ao processo de misturação e desenvolvimento de medidas de otimização energética neste setor.

Inicialmente recolheram-se os dados necessários ao levantamento energético a nível global na CMIP, para o ano de 2022, tendo-se determinado que o consumo de energia elétrica é o mais significativo de entre as restantes formas de energia (vapor e gás natural) correspondendo a 72,8% do consumo total com um custo associado de cerca 44 milhões de euros . Determinou-se igualmente o consumo específico global anual sendo esse valor igual a 269,8 kgep/ton.

No setor da misturação a energia elétrica é a forma de energia mais utilizada atingindo os 97,8% em relação ao consumo total de energia neste setor representando um custo de 19,5 milhões de euros. Verificou-se igualmente que a misturação é o processo com o maior consumo de energia elétrica de toda a fábrica chegando a representar cerca de 45% do consumo total da CMIP. Determinaram-se também os consumos específicos mensais relativos a este setor, apresentando um valor médio anual de 0,093 tep/ton.

A distribuição dos consumos de energia elétrica na misturação revelou que as misturadoras representam a maior parte desse consumo com 77,5% correspondendo a um custo de 15 milhões de euros. Calcularam-se os consumos específicos anuais, tendo-se verificado que as misturadoras 06, 07 e 10 são as que apresentam um valor do CEE mais elevado face às restantes em virtude da produção de compostos de sílica. Analisando comparativamente os CEE's das misturadoras *Single* com os das misturadoras *Tandem* verificou-se que as primeiras são cerca de 14% menos eficientes que as últimas.

A secção da ventilação constitui a segunda maior consumidora de energia elétrica no setor da misturação representando 6,12% em relação ao consumo total. O custo derivado desta aplicação corresponde a cerca de 1 milhão e 700 mil euros.

O consumo de energia elétrica para a produção de ar comprimido na área da misturação corresponde a 2,40% do consumo total encontrando-se repartido em duas

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

aplicações: serviços auxiliares (0,87%) e transporte de negro de fumo (1,67%). O custo total associado à produção de ar comprimido ascende a 480 mil euros.

Em relação às centrais de negro de fumo, a central relativa à misturação nova corresponde a 53,9% do consumo de energia elétrica para a produção de ar comprimido sendo que a central afeta à misturação velha corresponde aos restantes 46,1%. Calculou-se o consumo específico da central de negro de fumo da misturação velha tendo-se determinado um valor igual a 0,135 kWh/ton. Comparando com o consumo específico da central de ar de baixa pressão da CMIP (0,104 kWh/ton), reparou-se que a produção do ar comprimido pela central de negro de fumo antiga foi cerca de 23% mais dispendiosa.

Relativamente à iluminação, determinou-se o consumo de energia elétrica anual para esta aplicação com base nas características das luminárias presentes, tendo-se determinado que representam 2,22% em relação ao consumo total de energia elétrica equivalendo a um encargo de 424 mil euros.

Por último mas não menos importante, as restantes secções consideradas no setor da misturação (ACS, Óleos, Strainers, QUG, Torres de Refrigeração e Área de Baterias) correspondem aos restantes 11,7% do consumo total de energia elétrica apresentando um custo de cerca de 2 milhões de euros.

Após a etapa da auditoria propriamente dita, desenvolveram-se um conjunto de medidas com objetivo de otimizar o consumo de energia elétrica e vapor na área da misturação.

Na primeira medida, constatou-se que a energia elétrica consumida pelas misturadoras para a produção de compostos de sílica em regime OSM face à produção em MB+FM é cerca de 41,5% inferior, pelo que se delineou um plano em que consta o aumento da produção OSM em detrimento da produção MB+FM. A poupança anual obtida varia entre 163 € para uma produção de 90% MB+FM/10% OSM e 2291 € para 50% MB+FM/50% OSM.

Na segunda medida, realizou-se a otimização aos transformadores elétricos de duas formas distintas: Desligar transformadores que estejam conectados em paralelo para reduzir as perdas em vazio e a substituição de transformadores com uma potencia nominal de 2500 kVA por transformadores de 1600 kVA.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Relativamente à primeira proposta de otimização consegue-se obter uma poupança anual total de, aproximadamente, 9 720 €. Na segunda proposta de otimização estimou-se uma poupança de cerca 37 000 € ao longo do tempo vida médio considerado para os transformadores (30 anos). Uma vez que se projetou a aquisição de dois transformadores de 1600 kVA, incorrendo-se num investimento de 157 160 €, o período de retorno do capital investido situa-se em 4,25 anos.

Finalmente, na última medida de otimização desenvolveu-se um sistema de forma a aproveitar o calor residual dos condensados sujos para descongelar borracha. Para este sistema seria necessário a aquisição de um permutador de calor em espiral e um termoventilador pelo valor total de 15 431 €. A poupança anual obtida que seria de esperar através da implementação do sistema considerado proviria da eliminação do consumo de vapor que atualmente é utilizado para descongelar a borracha, sendo esse valor igual a, aproximadamente, 35 000€. Desta feita, o período de retorno de investimento para este projeto é igual a 0,42 anos ou aproximadamente 5 meses.



## 8. Proposta de Trabalhos Futuros

Devido à dimensão que a Continental Mabor possui atualmente seria impossível desenvolver todas as medidas de racionalização e otimização energética que se identificaram ao longo deste estágio. Face a esta situação compilam-se algumas medidas que poderiam ser desenvolvidas no futuro:

- Estudar a possibilidade do ar comprimido para o transporte de negro ser fornecido pela central de ar de baixa pressão visto ser produzido a um custo inferior;
- Avaliar a possibilidade da utilização do calor desperdiçado nas torres de refrigeração através da implementação de bombas de calor;
- Implementação de válvulas controladas por diferença de temperatura nas correntes de água que realizam o arrefecimento dos motores dos misturadores presentes na área da misturação velha.
- Finalização do isolamento das tubagens e acessórios do transporte de vapor para as baterias de aquecimento das UTA's;
- Realizar o aproveitamento do calor no processo de arrefecimento do óleo dos compressores das centrais de negro de fumo. Este aproveitamento poderá servir também para o descongelamento da borracha em alternativa ao sistema apresentado nesta dissertação.

## Referências Bibliográficas

- [1] C. AG, “Mabor - A marca,” 2023. [Online]. Available: <https://www.mabor.pt/ligeiros/the-brand>. [Acedido em 27 janeiro 2023].
- [2] S. Continental Mabor - Indústria de Pneus, “Continental Mabor - Quem Somos,” 2023. [Online]. Available: <https://www.continentalmabor.pt/>. [Acedido em 27 janeiro 2023].
- [3] R. d. Pneus, “Entrevista a Pedro Carreira - Continental Mabor,” 15 dezembro 2020. [Online]. Available: <https://revistadospneus.com/pt/2020/12/15/somos-uma-das-fabricas-mais-eficientes-do-grupo-continental-pedro-carreira-continental-mabor/>.
- [4] R. d. Pneus, “Continental Mabor presente na Hannover Messe 2022,” 5 junho 2022. [Online]. Available: <https://revistadospneus.com/pt/2022/06/05/continental-mabor-presente-na-hannover-messe-2022/>.
- [5] C. & S. S. Barreiros, “Continental Mabor - Produção,” 2023. [Online]. Available: [https://bcs.com.pt/featured\\_item/continental-mabor-producao/](https://bcs.com.pt/featured_item/continental-mabor-producao/). [Acedido em 27 janeiro 2023].
- [6] C. Mabor, *Política da Empresa*, 2022.
- [7] Nuno Santos Guedes, “Otimização Energética de Equipamentos Produtivos no Setor de Misturação,” ISEP, Porto, 2017.
- [8] Enerdata, “Total energy consumption in 2021,” Enerdata, 2022. [Online]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>.

- [9] REN, “Produção renovável abastece 59% do consumo de energia elétrica em 2021,” REN, 5 janeiro 2022. [Online]. Available: [https://www.ren.pt/pt-PT/media/comunicados/detalhe/producao\\_renovavel\\_abastece\\_59\\_\\_do\\_consumo\\_de\\_energia\\_eletrica\\_em\\_2021](https://www.ren.pt/pt-PT/media/comunicados/detalhe/producao_renovavel_abastece_59__do_consumo_de_energia_eletrica_em_2021).
- [10] Cooban, Anna, “Preços do gás natural estão nos níveis mais baixos desde que a Rússia entrou em guerra,” CNN Brasil, 6 janeiro 2023. [Online]. Available: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/precos-do-gas-natural-estao-nos-niveis-mais-baixos-desde-que-russia-entrou-em-guerra/>.
- [11] Zanatta, Pedro, “Entenda por que o preço do petróleo disparou com a guerra entre Ucrânia e Rússia,” CNN Brasil, 4 março 2022. [Online]. Available: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/entenda-por-que-o-preco-do-petroleo-disparou-com-a-guerra-entre-ucrania-e-russia/>.
- [12] G. Almeida, “Preço da eletricidade dispara para novo máximo. Já subiu 115% com a guerra,” CNN Portugal, 6 março 2022. [Online]. Available: <https://cnnportugal.iol.pt/geral/eletricidade-em-portugal-atinge-novo-maximo-historico-segunda-feira-preco-subiu-115-com-a-guerra/20220306/6224b6bc0cf2cc58e7e70a67>.
- [13] Georgina, P., “Impacto de alterações em compostos de borracha nas suas propriedades reológicas,” Universidade do Porto, Porto, 2015.
- [14] ContiAcademy, *Formação - Nível Básico: Noções básicas de pneus para veículos de passageiros*, Lousado, 2018.
- [15] Vinhas, H., “Otimização Energética de Equipamentos Produtivos,” Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Porto, 2016.
- [16] Sottomayor, M., “Aumento da Eficiência Energética no setor de Mistura,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.
- [17] Silva, P., *Apontamentos da Unidade Curricular Materiais e Aplicações (MATEAP) - Mestrado em Engenharia Química (ISEP)*, Porto, 2022.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

- [18] Gomes,M., “Vulcanização - Introdução,” Rubberpedia, [Online]. Available: <http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao/vulcanizacao.php>. [Acedido em 4 fevereiro 2023].
- [19] Benkreira,H, “Mixing,” Thermopedia, 2 fevereiro 2011. [Online]. Available: <https://www.thermopedia.com/content/960/>. [Acedido em 10 fevereiro 2023].
- [20] Limper,A, Mixing of Rubber Compounds, Munique: Hanser Publishers, 2012.
- [21] ContiAcademy, *Noções básicas - Materiais que constituem os pneus*, Lousado, 2018.
- [22] Z. Systems, “Plants for the Rubber and Tyre Industry,” [Online]. Available: <https://www.zeppelin-systems.com/media/zeppelin-systems-02-plants-for-the-rubber-and-tire-industry.pdf>. [Acedido em 23 abril 2023].
- [23] ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, Manual de Auditorias Energéticas na Indústria, Lisboa: ADENE - Agência para a Energia, 2019.
- [24] R. Pilão, Tabelas de Propriedades - Parte A - Água.
- [25] Bischoff & Ditzel Energy GmbH & Co. KG, “Energy Attribute Certificates,” 2019. [Online]. Available: <https://energy-attribute-certificates.com/>. [Acedido em 16 junho 2023].
- [26] Golden Energy, “Transformador elétrico,” [Online]. Available: <https://goldenergy.pt/glossario/transformador-eletrico/>. [Acedido em 16 junho 2023].
- [27] Dias, C., “Estudo Comparativo da desclassificação de Transformadores de Distribuição,” Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 2015.
- [28] Alves, A ;Souza, E.M et al, “O transformador: teoria, construção e análise do rendimento,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 44, 28 janeiro 2022.

- [29] Rogério Martins, “Distribuição das Perdas em nos Transformadores de Potência,” [Online]. Available: <https://www.colecoesfundacaoedp.edp.pt/nyron/library/catalog/winlibimg.aspx?key=4A6E6DCC697844AC9B613DCA297DA396&doc=162927&img=152259>. [Acedido em 16 junho 2023].
- [30] Schneider Electric, “Transformers TCO user guide,” [Online]. Available: <https://www.se.com/in/en/download/document/TCO/>. [Acedido em 10 março 2023].
- [31] Astlett Rubber, Inc., “Dealling with Frozen Rubber,” [Online]. Available: <https://www.astlettrubber.com/pdf/frozenrubber.pdf>. [Acedido em 20 junho 2023].
- [32] GoodPack, “Standart Containers,” [Online]. Available: <https://www.goodpack.com/products-solutions/containers/standard-containers/>. [Acedido em 20 junho 2023].
- [33] DGEG - Direção-Geral de Energia e Geologia, Manual SCE - Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético de Edifícios, ADENE - Agência para a Energia.
- [34] Alfa Laval, *Permutadores de calor em espiral - ALSHE LTL*.
- [35] MatWeb - Material Property Data, “Natural Rubber, Not Vulcanized (NR, IR, Polyisoprene),” [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=da912e0c50154649a201d8f7abbf7e90&n=1&ckck=1>. [Acedido em 20 junho 2023].
- [36] O. Nater, “Eight reasons to be concerned about our population reaching 8 billion,” Population Connection, 10 novembro 2022. [Online]. Available: <https://populationconnection.org/blog/eight-reasons-to-be-concerned-about-8-billion/>.
- [37] Silva, P., *Apontamentos da Unidade Curricular Materiais e Aplicações (MATEAP) - Mestrado em Engenharia Química (ISEP)*, Porto, 2022.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

- [38] HF Mixing Group, “Convex SERIES,” HF Mixing Group, 26 janeiro 2023. [Online]. Available: <https://www.hf-mixinggroup.com/en/products/downstream-equipment/convex-series/>. [Acedido em 10 fevereiro 2023].
- [39] Feierabend,R, *Basics of mixing*, ContiUniversity, 2003.
- [40] Silva, C., “Alimentação automática de blocos de polímeros na linha de misturação de borracha Big Tandem,” Universidade do Porto, Porto, 2018.
- [41] Franco SRL, *Heating*.
- [42] Schneider Eletric, *Catalogue of Trihal - Cast Resin transformer*, 2018.
- [43] EFACEC, “Transformadores PowerCast,” [Online]. Available: [http://www.efacec.cz/data/vyrobky/katalogy/suche/Transf\\_Powercast\\_DT04B0205B1.pdf](http://www.efacec.cz/data/vyrobky/katalogy/suche/Transf_Powercast_DT04B0205B1.pdf). [Acedido em 16 junho 2023].
- [44] Schneider Eletric, “Transformer, Trihal, Tier2, dry type, 1600kVA, 15kV, 400V, 17,5kV, IP00,” [Online]. Available: <https://www.se.com/ww/en/product/TRI160017K2A3YPD1/transformer-trihal-tier2-dry-type-1600kva-15kv-400v-175kv-ip00/>. [Acedido em 16 junho 2023].

## Anexos

### Anexo A – Caracterização Energética Global da CMIP

#### Anexo A.1 – Levantamento Energético CMIP

Para conhecer o consumo anual global de energia consumida pela CMIP foi necessário analisar as faturas mensais de energia elétrica, vapor e gás natural relativas ao ano de 2022. Na **Tabela A.1** encontra-se a informação extraída das faturas analisadas de uma forma resumida.

Tal como foi explicado **no subcapítulo 5.1**, o vapor consumido pela CMIP é gerado a duas pressões distintas 19 bar(r) e 26 bar(r). Nas faturas analisadas o consumo de vapor encontrava-se expresso apenas em “kg”, pelo que foi necessário recorrer a tabelas termodinâmicas [24] de modo a transformar estes valores em “kWh”. Analisando estas tabelas, verificou-se que a entalpia do vapor saturado à pressão de 19 bar(r) e 26 bar(r) corresponde a 2799,5 kJ/kg e 2803,3 kJ/kg, respetivamente. Tendo em conta que 1 kWh equivale a 3600 kJ foi possível então determinar as entalpias referidas em kWh/kg através da aplicação da **Equação A.1**.

$$H_{vapor\ saturado}(kWh/kg) = \frac{H_{vapor\ saturado}(kJ/kg)}{3600} \quad (A.1)$$

Desta feita, a entalpia de vapor saturado à pressão de 19 bar(r) corresponde a 0,7776 kWh/kg e a entalpia de vapor saturado à pressão de 26 bar(r) a 0,7787 kWh/kg.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Tabela A.1 - Consumo e Custo mensal da energia consumida pela CMIP no ano de 2022

| Energia     | Descrição/Mês              | jan/22       | fev/22       | mar/22       | abr/22       | mai/22       | jun/22       | jul/22       | ago/22       | set/22       | out/22       | nov/22       | dez/22       | Total         |
|-------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Elétrica    | Consumo (kWh)              | 15 448 621   | 14 974 486   | 16 248 096   | 14 857 456   | 17 244 231   | 16 294 263   | 17 488 481   | 10 669 054   | 16 565 354   | 16 804 279   | 15 886 351   | 10 941 181   | 183 421 853   |
|             | Custo (€)                  | 3 583 417,92 | 3 408 399,55 | 4 559 855,85 | 3 674 613,43 | 4 164 805,93 | 4 202 479,09 | 4 785 217,59 | 3 541 994,29 | 4 319 338,18 | 3 189 818,82 | 2 530 485,29 | 2 234 645,41 | 44 195 071,35 |
| Vapor       | Consumo Vapor 19 bar (kg)  | 19 491 630   | 18 420 560   | 18 624 180   | 16 191 470   | 17 528 330   | 15 107 750   | 16 053 050   | 9 841 750    | 16 268 940   | 17 054 160   | 17 281 310   | 12 128 260   | 193 991 390   |
|             | Consumo Vapor 26 bar (kg)  | 225 000      | 227 000      | 251 000      | 223 000      | 264 000      | 249 000      | 258 000      | 122 000      | 256 000      | 269 000      | 260 000      | 172 000      | 2 776 000     |
|             | Consumo Vapor 19 bar (kWh) | 15 157 449   | 14 324 544   | 14 482 887   | 12 591 117   | 13 630 711   | 11 749 298   | 13 073 704   | 7 653 328    | 12 651 360   | 13 261 978   | 13 438 619   | 9 431 407    | 151 446 401   |
|             | Consumo Vapor 26 bar (kWh) | 175 208      | 176 765      | 195 454      | 173 650      | 205 577      | 193 896      | 200 905      | 95 001       | 199 347      | 209 470      | 202 462      | 133 936      | 2 161 671     |
|             | Custo Vapor 19 bar (€)     | 1 431 917,15 | 1 060 029,02 | 1 015 220,67 | 1 679 526,46 | 1 549 793,30 | 1 316 439,00 | 1 481 592,47 | 1 289 774,40 | 2 821 252,03 | 2 814 985,69 | 2 407 839,09 | 1 295 078,59 | 20 163 447,87 |
|             | Custo Vapor 26 bar (€)     | 19 009,64    | 15 095,37    | 15 744,95    | 20 858,18    | 20 743,78    | 18 377,05    | 21 073,66    | 14 104,91    | 39 628,63    | 40 220,30    | 32 439,00    | 16 570,19    | 273 865,66    |
|             | Consumo Vapor Total (kWh)  | 15 332 657   | 14 501 309   | 14 678 340   | 12 764 767   | 13 836 288   | 11 943 194   | 13 274 608   | 7 748 329    | 12 850 708   | 13 471 448   | 13 641 081   | 9 565 343    | 153 608 072   |
|             | Custo Total Vapor (€)      | 1 450 926,79 | 1 075 124,39 | 1 030 965,62 | 1 700 384,64 | 1 570 537,08 | 1 334 816,05 | 1 502 666,13 | 1 303 879,31 | 2 860 880,66 | 2 855 205,99 | 2 440 278,09 | 1 311 648,78 | 20 437 313,53 |
| Gás Natural | Consumo (kWh)              | 64 060       | 64 805       | 64 000       | 62 422       | 42 328       | 37 121       | 33 335       | 28 809       | 31 845       | 32 626       | 67 188       | 63 588       | 592 127       |
|             | Custo (€)                  | 2 862,68     | 2 875,67     | 2 866,49     | 2 948,43     | 2 069,81     | 1 833,81     | 1 755,95     | 1 317,26     | 1 680,02     | 1 837,26     | 3 537,54     | 3 366,94     | 28 951,86     |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

O custo médio unitário da energia elétrica, vapor e gás natural corresponde ao quociente entre o consumo total durante o ano de 2022, em kWh, e o respetivo custo, em euros, tal como se representa na **Equação A.2**.

$$\text{Custo unitário} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = \frac{\text{Custo (€)}}{\text{Consumo Energia (kWh)}} \quad (\text{A.2})$$

Assim o custo unitário da energia elétrica, do vapor e do gás natural ficam:

$$\text{Custo unitário Energia Elétrica} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = \frac{44\,195\,071,35}{183\,421\,853} = 0,24095 \text{ €/kWh}$$

$$\text{Custo unitário Vapor} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = \frac{20\,437\,313,53}{153\,608\,072} = 0,13305 \text{ €/kWh}$$

$$\text{Custo unitário Gás Natural} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = \frac{28\,951,86}{592\,127} = 0,04889 \text{ €/kWh}$$

O consumo de ar comprimido encontra-se contemplado no consumo total de energia elétrica presente na **Tabela A.1**, pelo que, para analisá-lo de forma isolada recorreu-se ao sistema de monitorização de energia da CMIP denominado de *MessDas*. Na **Tabela A.2**, encontra-se assim o consumo mensal de ar comprimido na CMIP no ano de 2022.

**Tabela A.2** - Consumo de ar comprimido, em kWh, pela CMIP no ano de 2022

| Ar comprimido |                   |
|---------------|-------------------|
| Mês           | Consumo (kWh)     |
| jan/22        | 1 360 390         |
| fev/22        | 1 342 924         |
| mar/22        | 1 504 348         |
| abr/22        | 1 358 296         |
| mai/22        | 1 579 888         |
| jun/22        | 1 483 052         |
| jul/22        | 1 560 016         |
| ago/22        | 1 006 940         |
| set/22        | 1 463 075         |
| out/22        | 1 520 660         |
| nov/22        | 1 482 284         |
| dez/22        | 1 049 054         |
| <b>Total</b>  | <b>16 710 926</b> |

A relação entre o consumo de ar comprimido e o consumo de energia elétrica total pode ser calculado a partir da **Equação A.3**.

$$\begin{aligned} \frac{\text{ar comprimido (kWh)}}{\text{Energia Elétrica (kWh)}} &= \frac{16\,710\,926}{183\,421\,853} \\ &= 0,091 \cong 9\% \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

## Anexo A.2 – Fatores de conversão de energia

Para efeitos do SGCIE, o Despacho nº 17313/2008, de 26 de junho, procedeu à publicação dos fatores de conversão para tep [23].

Para a energia elétrica, o fator de conversão assume o valor de  $215 \times 10^{-6}$  tep/kWh.

Para a energia proveniente do vapor o despacho mencionado considera a expressão representada pela **Equação A.4**:

$$\text{Energia do Vapor} \left( \frac{\text{tep}}{\text{ton}} \right) = \frac{H_{\text{vapor}} \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)}{\eta_{\text{térmico}} \times 41,868} \quad (\text{A.4})$$

Para efeitos do despacho mencionado, o valor do rendimento térmico ( $\eta_{\text{térmico}}$ ) das caldeiras utilizadas atualmente para a geração de vapor assume o valor de 0,9.

Para converter a energia do vapor de tep/ton para tep/kWh dividi-se o primeiro pela entalpia do vapor em kWh/ton, tal como se demonstra na **Equação A.5**.

$$\text{Energia do Vapor} \left( \frac{\text{tep}}{\text{kWh}} \right) = \frac{\text{Energia do Vapor} \left( \frac{\text{tep}}{\text{ton}} \right)}{H_{\text{vapor}} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \right)} \quad (\text{A.5})$$

Assim, para a situação do vapor à pressão de **19 bar(r)** tem-se:

$$Energia do Vapor 19 bar \left( \frac{tep}{kWh} \right) = \frac{2,7995}{0,9 \times 41,868 \times 0,7776} = 9,55 \times 10^{-5}$$

Para a pressão de **26 bar(r)**:

$$Energia do Vapor 26 bar \left( \frac{tep}{kWh} \right) = \frac{2,8033}{0,9 \times 41,868 \times 0,7787} = 9,55 \times 10^{-5}$$

No caso do gás natural, como se trata da utilização direta de um combustível primário o fator de conversão está diretamente relacionado com o valor do PCI (Poder Calorífico Inferior), que segundo o Despacho nº 17313/2008 assume os valores de 1,077 tep/ton e 45,1 MJ/kg.

Assim, a conversão da energia contida no gás natural, em kWh para tep, pode ser conseguida através da expressão da **Equação A.6**.

$$Energia do gás natural \left( \frac{tep}{kWh} \right) = \frac{PCI \left( \frac{tep}{ton} \right)}{PCI \left( \frac{kWh}{ton} \right)} = \frac{1,077}{45,1 \times 10^6 / 3600} \quad (A.6)$$

$$= 8,60 \times 10^{-5}$$

Através dos fatores de conversão apresentados, torna-se possível calcular os consumos de energia, em tep, tal como se demonstra nas Equações **A.7**, **A.8**, **A.9** e **A.10**.

$$Energia Elétrica (tep) = 215 \times 10^{-6} \times 166\,710\,927 = 35\,843 \quad (A.7)$$

$$Ar comprimido (tep) = 215 \times 10^{-6} \times 166\,710\,927 = 3593 \quad (A.8)$$

$$Vapor(tep) = 9,55 \times 10^{-5} \times 153\,608\,072 = 14\,675 \quad (A.9)$$

$$Gás natural (tep) = 8,60 \times 10^{-5} \times 592\,127 = 50,9 \quad (A.10)$$

### Anexo A.3 – Emissões CELE – Produção de Vapor

A CMIP adquire energia térmica sob a forma de vapor de uma empresa externa, pelo que de acordo com o contrato estabelecido tem que suportar parte dos custos relacionados com as emissões de GEE de acordo com a Diretiva 2003/87/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 13 outubro de 2003 relativa ao regime de Comércio de Licenças de Emissão de gases com efeito de estufa (CELE).

Assim, na **Tabela A.3** encontra-se representadas as emissões de GEE mensais, em ton CO<sub>2</sub>e atribuídas à CMIP durante o ano de 2022 bem como os respetivos custos associados, tendo-se em conta que por cada tonelada de CO<sub>2</sub>e emitida o custo foi igual a 80 €.

**Tabela A.3** -Licenças CELE mensais atribuídas à CMIP durante o ano de 2022, em tonCO<sub>2</sub>e, e o respetivo custo associado

| Mês          | Licenças CELE atribuídas à CMIP | Custo (€)/ton CO <sub>2</sub> e | Custo (€)           |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| jan/22       | 2 955                           | 80                              | 236 371,18          |
| fev/22       | 2 715                           |                                 | 217 179,57          |
| mar/22       | 2 397                           |                                 | 191 724,17          |
| abr/22       | 2 416                           |                                 | 193 265,18          |
| mai/22       | 2 666                           |                                 | 213 258,29          |
| jun/22       | 2 205                           |                                 | 176 410,02          |
| jul/22       | 2 318                           |                                 | 185 423,31          |
| ago/22       | 1 445                           |                                 | 115 580,67          |
| set/22       | 2 394                           |                                 | 191 519,63          |
| out/22       | 2 488                           |                                 | 199 047,51          |
| nov/22       | 2 595                           |                                 | 207 631,82          |
| dez/22       | 1 678                           |                                 | 134 251,51          |
| <b>Total</b> | <b>28 271</b>                   |                                 | <b>2 261 662,87</b> |

O custo acumulado para o ano de 2022 ascendeu aos 2 261 662,87 €.

## Anexo A.4 – Produção e Consumos Específicos de Energia da CMIP

Na **Tabela A.4** representa-se a produção mensal alcançada pela CMIP durante o ano de 2022, tanto em quantidade de pneus produzidos como também em toneladas.

**Tabela A.4** - Produção mensal alcançada pela CMIP, durante o ano de 2022, em quantidade de pneus e toneladas

| Mês          | Produção (Quantidade pneus) | Produção (ton) |
|--------------|-----------------------------|----------------|
| jan/22       | 1 474 559                   | 16 286         |
| fev/22       | 1 548 483                   | 17 128         |
| mar/22       | 1 685 655                   | 18 682         |
| abr/22       | 1 472 495                   | 16 468         |
| mai/22       | 1 772 118                   | 19 485         |
| jun/22       | 1 615 478                   | 17 816         |
| jul/22       | 1 707 455                   | 18 934         |
| ago/22       | 829 471                     | 9 604          |
| set/22       | 1 692 706                   | 18 702         |
| out/22       | 1 689 874                   | 18 772         |
| nov/22       | 1 574 932                   | 17 647         |
| dez/22       | 1 021 363                   | 11 391         |
| <b>Total</b> | <b>18 084 589</b>           | <b>200 916</b> |

Agregando os dados relativos à produção, representados na **Tabela A.4**, com os dados energéticos presentes na **Tabela A.1**, foi possível calcular os consumos específicos mensais e anual por tipo de energia primária, durante o ano de 2022 na CMIP.

Os resultados obtidos são apresentados nas **Tabelas A.5 e A.6**.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela A.5** - Consumos específico mensais e anual por tipo de energia primária e global, em kWh/ton, da CMIP no ano de 2022

| Mês          | CEE Energia Elétrica (kWh/ton) | CEE Vapor (kWh/ton) | CEE Gás Natural (kWh/ton) |
|--------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------|
| jan/22       | 949                            | 941                 | 3,93                      |
| fev/22       | 874                            | 847                 | 3,78                      |
| mar/22       | 870                            | 786                 | 3,43                      |
| abr/22       | 902                            | 775                 | 3,79                      |
| mai/22       | 885                            | 710                 | 2,17                      |
| jun/22       | 915                            | 670                 | 2,08                      |
| jul/22       | 924                            | 701                 | 1,76                      |
| ago/22       | 1 111                          | 807                 | 3,00                      |
| set/22       | 886                            | 687                 | 1,70                      |
| out/22       | 895                            | 718                 | 1,74                      |
| nov/22       | 900                            | 773                 | 3,81                      |
| dez/22       | 960                            | 840                 | 5,58                      |
| <b>Total</b> | <b>913</b>                     | <b>765</b>          | <b>2,95</b>               |

**Tabela A.6** - Consumos específico mensais e anual por tipo de energia primária, em kgep/ton, da CMIP no ano de 2022

| Mês          | CEE Energia Elétrica (kgep/ton) | CEE Vapor (kgep/ton) | CEE Gás Natural (kgep/ton) | CEE Global (kgep/ton) |
|--------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|
| jan/22       | 204                             | 89,9                 | 0,338                      | 294,2                 |
| fev/22       | 188                             | 80,9                 | 0,325                      | 269,2                 |
| mar/22       | 187                             | 75,1                 | 0,295                      | 262,3                 |
| abr/22       | 194                             | 74,1                 | 0,326                      | 268,4                 |
| mai/22       | 190                             | 67,8                 | 0,187                      | 258,3                 |
| jun/22       | 197                             | 64,0                 | 0,179                      | 260,9                 |
| jul/22       | 199                             | 67,0                 | 0,151                      | 265,7                 |
| ago/22       | 239                             | 77,1                 | 0,258                      | 316,2                 |
| set/22       | 190                             | 65,6                 | 0,146                      | 256,2                 |
| out/22       | 192                             | 68,6                 | 0,149                      | 261,2                 |
| nov/22       | 194                             | 73,9                 | 0,327                      | 267,7                 |
| dez/22       | 207                             | 80,2                 | 0,480                      | 287,2                 |
| <b>Total</b> | <b>196</b>                      | <b>73,0</b>          | <b>0,253</b>               | <b>269,6</b>          |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Como exemplo de cálculo dos consumos específicos de energia tome-se o mês de janeiro:

Da **Tabela A.3**:

$$Produção (ton) = 16\,286$$

- Energia Elétrica

Da **Tabela A.1**:

$$Energia Elétrica (kWh) = 15\,448\,621$$

O consumo específico de energia é o quociente entre a energia consumida e o valor da produção (**Equação A.11**), pelo que:

$$CEE \left( \frac{kWh}{ton} \right) = \frac{15\,448\,621}{16\,286} \cong 949 \quad (\text{A.11})$$

De forma a transformar o CEE em kWh/ton para kgep/ton aplica-se o fator de conversão (tep/kWh) relativo à energia elétrica, presente no **Anexo A.2**. Assim o valor do CEE, em kgep/ton, referente ao consumo de energia elétrica fica (**Equação A.12**):

$$\begin{aligned} CEE \left( \frac{kgep}{ton} \right) &= CEE \left( \frac{kWh}{ton} \right) \times \text{fator de conversão ELE} \left( \frac{tep}{kWh} \right) \\ &\times 1000 \leftrightarrow CEE \left( \frac{kgep}{ton} \right) = 949 \times 215 \times 10^{-6} \times 1000 \\ &\cong 204 \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

- Vapor

Da **Tabela A.1**, retira-se o consumo de energia térmica proveniente do vapor no mês de janeiro:

$$Energia Vapor (kWh) = 15\,332\,657$$

De forma idêntica ao cálculo do CEE relativo à energia elétrica, em kWh, o CEE referente ao vapor fica (**Equação A.13**):

$$CEE \left( \frac{kWh}{ton} \right) = \frac{15\,332\,657}{16\,286} \cong 941 \quad (\text{A.13})$$

De forma a transformar o CEE em kWh/ton para kgep/ton, aplica-se o fator de conversão (tep/kWh) relativo à energia térmica contida no vapor, presente no **Anexo A.2**. Assim o valor do CEE, em kgep/ton, referente ao consumo de vapor fica (**Equação A.14**):

$$\begin{aligned} CEE \left( \frac{kgep}{ton} \right) &= CEE \left( \frac{kWh}{ton} \right) \times \text{fator de conversão ELE} \left( \frac{tep}{kWh} \right) \\ &\times 1000 \leftrightarrow CEE \left( \frac{kgep}{ton} \right) = 949 \times 9,55 \times 10^{-5} \times 1000 \\ &\cong 89,9 \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

- Gás Natural

Da **Tabela A.1**, retira-se o consumo de energia térmica proveniente do vapor no mês de janeiro:

$$Energia\ Gás\ Natural\ (kWh) = 64\ 060$$

De forma idêntica ao cálculo do CEE relativo à energia elétrica, em kWh/ton, o CEE referente ao gás natural fica:

$$CEE\left(\frac{kWh}{ton}\right) = \frac{64\ 060}{16\ 286} \cong 3,93$$

De forma a transformar o CEE em kWh/ton para kgep/ton aplica-se o fator de conversão (tep/kWh) relativo à energia proveniente do gás natural, presente no **Anexo A.2**. Assim o valor do CEE, em kgep/ton, referente ao consumo de gás natural fica (**Equação A.15**):

$$\begin{aligned} CEE\left(\frac{kgep}{ton}\right) &= CEE\left(\frac{kWh}{ton}\right) \times \text{fator de conversão ELE}\left(\frac{tep}{kWh}\right) \\ &\times 1000 \leftrightarrow CEE\left(\frac{kgep}{ton}\right) \\ &= 3,93 \times 8,60 \times 10^{-5} \times 1000 \cong 0,338 \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

## Anexo B – Caracterização Energética Setor Misturação

### Anexo B.1 – Consumos mensais de Energia Elétrica e Vapor no setor da misturação

De modo a determinar o consumo de energia elétrica e vapor no ano de 2022 no setor da misturação foi necessário recorrer ao software *MessDas* para retirar os consumos mensais durante o mesmo período.

Assim, na **Tabela B.1** encontram-se apresentados os consumos mensais de energia elétrica e vapor no setor da misturação durante o ano de 2022. Na apresentação destes consumos destaca-se o consumo de ar comprimido do consumo de energia elétrica.

**Tabela B.1** - Consumos mensais de Energia Elétrica e Vapor no setor da misturação no ano de 2022

| Mês               | Energia Elétrica (kWh) | Energia Elétrica (tep) | Ar comprimido (kWh) | Ar comprimido (tep) | Vapor (kWh)      | Vapor (tep) |
|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------|
| jan/22            | 6 753 928              | 1 452                  | 175 333             | 37,7                | 1 440 670        | 138         |
| fev/22            | 6 520 800              | 1 402                  | 171 034             | 36,8                | 1 056 199        | 101         |
| mar/22            | 6 915 390              | 1 487                  | 194 546             | 41,8                | 618 403          | 59          |
| abr/22            | 6 447 342              | 1 386                  | 170 586             | 36,7                | 331 656          | 32          |
| mai/22            | 7 475 816              | 1 607                  | 194 878             | 41,9                | 887              | 0,085       |
| jun/22            | 7 029 607              | 1 511                  | 182 177             | 39,2                | 0                | 0           |
| jul/22            | 7 550 021              | 1 623                  | 197 163             | 42,4                | 0                | 0           |
| ago/22            | 4 268 886              | 918                    | 100 641             | 21,6                | 0                | 0           |
| set/22            | 7 094 781              | 1 525                  | 163 327             | 35,1                | 0                | 0           |
| out/22            | 7 306 432              | 1 571                  | 155 692             | 33,5                | 11 475           | 1,10        |
| nov/22            | 6 848 099              | 1 472                  | 164 891             | 35,5                | 322 315          | 30,8        |
| dez/22            | 4 645 878              | 999                    | 119 666             | 25,7                | 373 904          | 35,7        |
| <b>Total 2022</b> | <b>78 856 980</b>      | <b>16 954</b>          | <b>1 989 934</b>    | <b>428</b>          | <b>4 155 510</b> | <b>397</b>  |

## Anexo B.2 – Exemplo de cálculo do custo do consumo de Energia Elétrica e de Vapor no setor da Misturação

- Energia Elétrica

Da **Tabela B.1** retira-se o valor do consumo de energia elétrica, em kWh, no setor da misturação, dado pela soma entre as parcelas de energia elétrica e ar comprimido (**Equação B.1**).

$$Energia\ Elétrica_{mixing} (kWh) = 78\,856\,980 + 1\,989\,934 = 80\,846\,915 \quad (\text{B.1})$$

Do **Anexo A.1** sabe-se que o custo unitário da energia elétrica na CMIP em 2022 foi igual a 0,24095 €/kWh. Assim, o custo da energia elétrica consumida no setor da misturação foi igual a 19 479 877,13 € (**Equação B.2**).

$$\begin{aligned} \text{Custo Energia Elétrica}_{mixing} &= Energia\ Elétrica_{mixing} (kWh) \\ &\times \text{Custo unitário ELE} \left( \frac{\text{€}}{kWh} \right) = 80\,846\,915 \times 0,24095 \\ &= 19\,479\,877,13 \text{ €} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

A mesma tipologia de cálculo é utilizada para calcular o custo do consumo de energia elétrica dos equipamentos e serviços auxiliares no setor da misturação.

- Vapor

Da **Tabela B.1** retira-se o valor do consumo de vapor no setor da misturação, sendo igual a 4 155 510 kWh.

Do **Anexo A.1** sabe-se que o custo unitário do vapor na CMIP em 2022 foi igual a 0,13305 €/kWh. Assim, o custo do vapor consumido no setor da misturação foi igual a 552 884,06 € (**Equação B.3**).

$$\begin{aligned}
 \text{Custo Vapor}_{mixing} &= \text{Vapor}_{mixing} \text{ (kWh)} \\
 &\times \text{Custo unitário Vapor} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \\
 &= 4\,155\,510 \times 0,13305 = 552\,884,06 \text{ €}
 \end{aligned}
 \tag{B.3}$$

### Anexo B.3 – Exemplo de cálculo dos CEE's mensais no setor da misturação

No exemplo de cálculo apresentado considera-se o mês de janeiro como o mês de referência.

Da **Figura 5.6** retira-se que o valor da energia consumida, no mês de janeiro de 2022 é igual a 1490 tep. Da **Figura 5.7** retira-se que a produção de compostos de borracha durante o mesmo período ascendeu a 16 021 ton.

Assim o CEE, em tep/ton, no setor da misturação realtivo ao mês de janeiro é dado pela **Equação B.4**:

$$\text{CEE}_{mixing} \left( \frac{\text{tep}}{\text{ton}} \right) = \frac{1490}{16\,021} = 0,102
 \tag{B.4}$$

## **Anexo B.4 – Distribuição dos consumos de energia elétrica no setor da misturação**

Por forma a conhecer o consumo de energia elétrica anual em cada uma das secções da misturação foi necessário analisar o consumo homólogo mensal registado no software *MessDas*. Assim na **Tabela B.2** encontram-se os consumos mensais de cada uma das secções do setor da misturação no ano de 2022.

De realçar que na **Tabela B.2** não se encontra o consumo de iluminação mensal uma vez que ele não se encontra registado no *MessDas*, pelo que apenas se determinou o consumo anual, encontrando-se representado na **Tabela B.3**.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Tabela B.2 - Consumo mensal de Energia Elétrica por secção no setor da misturação no ano de 2022

| Consumo (kWh)                 | jan/22  | fev/22  | mar/22  | abr/22  | mai/22  | jun/22  | jul/22  | ago/22  | set/22  | out/22  | nov/22  | dez/22  | Total     |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Misturadora 00                | 372 475 | 369 756 | 399 362 | 354 075 | 408 543 | 371 603 | 394 893 | 9 821   | 398 438 | 426 458 | 388 184 | 267 620 | 4 161 229 |
| Misturadora 01                | 286 103 | 274 417 | 299 561 | 276 072 | 292 302 | 293 601 | 319 595 | 220 018 | 304 945 | 309 440 | 284 861 | 181 559 | 3 342 474 |
| Misturadora 02                | 364 267 | 391 323 | 430 236 | 366 043 | 413 856 | 380 947 | 402 778 | 35 136  | 399 434 | 447 174 | 421 885 | 274 936 | 4 328 015 |
| Misturadora 03                | 231 744 | 217 621 | 246 051 | 222 930 | 247 730 | 217 673 | 245 451 | 179 232 | 231 065 | 241 538 | 228 365 | 150 068 | 2 659 468 |
| Misturadora 04                | 458 971 | 422 259 | 510 768 | 426 988 | 476 807 | 454 178 | 514 176 | 344 852 | 500 854 | 577 616 | 496 170 | 327 887 | 5 511 527 |
| Misturadora 05                | 441 841 | 442 866 | 490 365 | 457 607 | 517 193 | 469 350 | 522 934 | 121 527 | 497 843 | 495 448 | 469 214 | 306 099 | 5 232 286 |
| Misturadora 06                | 447 434 | 453 337 | 226 511 | 441 609 | 529 403 | 490 384 | 479 373 | 315 729 | 469 851 | 480 713 | 438 654 | 255 995 | 5 028 993 |
| Misturadora 07                | 438 963 | 439 956 | 499 510 | 429 347 | 513 495 | 480 637 | 507 989 | 309 561 | 486 419 | 509 332 | 459 570 | 294 892 | 5 369 671 |
| Misturadora 09                | 400 731 | 400 560 | 434 982 | 384 050 | 430 380 | 404 460 | 435 646 | 70 266  | 431 514 | 430 606 | 402 909 | 263 521 | 4 489 627 |
| Misturadora 10                | 488 504 | 496 013 | 533 389 | 460 696 | 526 413 | 502 149 | 522 054 | 351 181 | 465 952 | 498 039 | 468 943 | 337 441 | 5 650 774 |
| Misturadora 11                | 696 855 | 587 214 | 659 286 | 603 090 | 735 595 | 649 218 | 649 164 | 532 471 | 623 252 | 538 821 | 571 840 | 404 774 | 7 251 580 |
| Misturadora 12                | 689 483 | 702 231 | 790 224 | 713 940 | 825 058 | 766 607 | 813 225 | 450 669 | 683 400 | 725 722 | 689 286 | 481 641 | 8 331 485 |
| Strainer 1                    | 112 025 | 107 335 | 119 736 | 105 299 | 121 253 | 115 738 | 115 513 | 57 771  | 123 596 | 115 943 | 114 136 | 70 153  | 1 278 498 |
| Strainer 2                    | 204 113 | 194 538 | 215 749 | 193 129 | 224 828 | 207 147 | 228 928 | 154 917 | 215 465 | 223 180 | 222 194 | 147 070 | 2 431 258 |
| Ar comprimido - Negro de Fumo | 119 745 | 117 342 | 133 657 | 115 229 | 131 450 | 123 396 | 137 209 | 59 997  | 105 339 | 95 277  | 106 615 | 79 107  | 1 324 363 |
| ACS                           | 23 931  | 23 017  | 25 051  | 22 581  | 23 868  | 21 941  | 23 617  | 15 825  | 22 730  | 23 562  | 22 511  | 16 053  | 264 688   |
| Óleos                         | 58 998  | 50 589  | 55 362  | 50 739  | 51 909  | 45 536  | 47 360  | 42 573  | 48 612  | 52 648  | 53 627  | 51 680  | 609 633   |
| Ventilação                    | 328 371 | 329 699 | 340 103 | 313 258 | 480 770 | 469 543 | 537 231 | 379 039 | 459 130 | 458 467 | 444 121 | 306 773 | 4 846 505 |
| Torres Refrigeração           | 69 793  | 64 657  | 72 172  | 67 798  | 91 527  | 90 933  | 104 942 | 70 819  | 98 224  | 94 573  | 76 382  | 69 623  | 971 443   |
| Área Baterias                 | 83 570  | 79 899  | 90 577  | 85 394  | 104 325 | 101 823 | 109 594 | 68 605  | 114 004 | 111 139 | 107 606 | 69 623  | 1 126 159 |
| Ar Comprimido (Auxiliares)    | 55 588  | 53 692  | 60 889  | 55 357  | 63 429  | 58 780  | 59 954  | 40 645  | 57 988  | 60 416  | 58 276  | 40 559  | 665 572   |
| Quadros de Usos Gerais        | 210 336 | 212 300 | 235 402 | 214 820 | 227 494 | 222 382 | 240 087 | 156 749 | 224 251 | 229 981 | 221 493 | 180 157 | 2 575 449 |

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Tabela B.3 - Consumo anual e por tipo de iluminação no setor da misturação no ano de 2022

|               | Tipo de iluminação                               | Quantidade  | # Armaduras | Potência (kW) | Horas funcionamento (h) | Energia consumida anual (kWh) |
|---------------|--------------------------------------------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>T8</b>     | 4x18W                                            | 78          | 4           | 5,62          | 8760                    | 49 196                        |
|               | 2x58W                                            | 301         | 2           | 34,9          | 8760                    | 305 864                       |
|               | 2x36W                                            | 223         | 2           | 16,1          | 8760                    | 140 651                       |
|               | 1x36W                                            | 3           | 1           | 0,108         | 8760                    | 946                           |
|               | 1x58W                                            | 44          | 1           | 2,55          | 8760                    | 22 356                        |
|               | 2x18W                                            | 96          | 2           | 3,46          | 8760                    | 30 275                        |
|               | <b>Total T8</b>                                  | <b>745</b>  | <b>12</b>   | <b>62,7</b>   | -                       | <b>549 287</b>                |
| <b>T5</b>     | 1x54W                                            | 60          | 1           | 3,2           | 8760                    | 28 382                        |
|               | 4x54W                                            | 564         | 4           | 121,8         | 8760                    | 1 067 178                     |
|               | 1x49W                                            | 67          | 1           | 3,28          | 8760                    | 28 759                        |
|               | 2x54W                                            | 1           | 2           | 0,108         | 8760                    | 946                           |
|               | 1x28W                                            | 1           | 1           | 0,0280        | 8760                    | 245                           |
|               | <b>Total T5</b>                                  | <b>693</b>  | <b>9</b>    | <b>128,5</b>  | -                       | <b>1 125 511</b>              |
| <b>LED</b>    | LED SF 198W Dali Sensor                          | 7           | -           | 1,39          | 8760                    | 12 141                        |
|               | LED SF 198W Dali Sensor c/ Kit                   | 4           |             | 0,792         | 8760                    | 6 938                         |
|               | 4x14w BEP LED                                    | 13          | 4           | 0,728         | 8760                    | 6 377                         |
|               | Philips WT120C<br>1xLED60S840 L1500 IP65<br>IK08 | 12          | 1           | 0,515         | 8760                    | 4 510                         |
|               | ECO LED 29W                                      | 30          | -           | 0,870         | 8760                    | 7 621                         |
|               | ECO LED 16W                                      | 9           | -           | 0,144         | 8760                    | 1 261                         |
|               | LED S 46W                                        | 12          | -           | 0,552         | 8760                    | 4 836                         |
|               | LEDVANCE Panelled Value<br>600 40W               | 4           | -           | 0,016         | 8760                    | 140                           |
|               | LED S 44W                                        | 8           | -           | 0,352         | 8760                    | 3 084                         |
|               | LED 2x49W                                        | 4           | 2           | 0,392         | 8760                    | 3 434                         |
|               | Hinds LPL06 C57-7L-LT<br>ATEX 70W                | 15          | -           | 1,05          | 8760                    | 9 198                         |
|               | Schröder NEOS 2 1737 CMD<br>TD 150W              | 10          | -           | 1,50          | 8760                    | 13 140                        |
|               | <b>Total LED</b>                                 | <b>128</b>  | -           | <b>8,30</b>   | -                       | <b>72 680</b>                 |
| <b>Outras</b> | Electricol EPA-EC 2x18W PL-L                     | 5           | 2           | 0,180         | 8760                    | 1 577                         |
|               | SEAE MKEP 310.218 HFW<br>2G11 2x18W              | 13          | 2           | 0,468         | 8760                    | 4 100                         |
|               | SEAE G24q-2 2x18W                                | 14          | 2           | 0,504         | 8760                    | 4 415                         |
|               | Europhane T2 RVCP Maxi<br>250W                   | 1           | -           | 0,250         | 8760                    | 2 190                         |
|               | <b>Total Outras</b>                              | <b>33</b>   | <b>6</b>    | <b>1,40</b>   | -                       | <b>12 282</b>                 |
| <b>Total</b>  | -                                                | <b>1599</b> | <b>61</b>   | -             | -                       | <b>1 759 760</b>              |

- **Exemplo de cálculo do consumo anual de energia elétrica relativa à iluminação**

Como exemplo de cálculo do consumo de energia elétrica relativa à iluminação, considere-se a luminária T5 com uma potência unitária de 18 W. No setor da misturação existem 78 luminárias deste tipo sendo que cada uma apresenta 4 armaduras (**Tabela B.3**).

Considerou-se que a iluminação esteve ligada os 365 dias do ano durante 24 horas. Assim o consumo de energia associado a estas luminárias é dado pela **Equação B.5**.

$$\begin{aligned}
 \text{Energia Luminárias}_{T5\ 4 \times 18W} \left( \frac{kWh}{ano} \right) &= P_{unitária}(kW) \times Quantidade \times \#armaduras \\
 &\times horas funcionamento \left( \frac{h}{ano} \right) = 5,62 \times 78 \times 4 \times 8760 \\
 &= 49\ 196
 \end{aligned}
 \tag{B.5}$$

### **Anexo B.5 – Cálculo da Distribuição do Consumo de Energia Elétrica por tipo de misturadora**

Do **Capítulo 3** já se viu que:

Misturadoras *Single* Finais – ML00, ML01 e ML03

Misturadoras *Single* Master – ML02 e ML04 até ML07

Misturadoras Tandem – ML09 até ML12.

Na **Tabela B.2** estão presentes os consumos anuais de cada misturadora, pelo que se pode determinar o consumo anual por tipo de misturadora (**Equações B.6-B.8**):

$$Energia\ Elétrica_{Finais}(kWh) = 2\,448\,792 \quad (B.6)$$

$$Energia\ Elétrica_{Masters}(kWh) = 6\,137\,056 \quad (B.7)$$

$$Energia\ Elétrica_{Tandem}(kWh) = 6\,198\,010 \quad (B.8)$$

Em termos percentuais o consumo de energia elétrica por tipo de misturadora é dado pelo quociente entre o consumo de cada grupo de misturadoras considerado pelo consumo total de todas as misturadoras (61 357 128 kWh - **Tabela 5.4**) (**Equações B.9 – B.11**).

$$\%Energia_{Finais} = \frac{2\,448\,792}{61\,357\,128} \times 100 = 16,6\% \quad (B.9)$$

$$\%Energia_{Masters} = \frac{6\,137\,056}{61\,357\,128} \times 100 = 41,5\% \quad (B.10)$$

$$\%Energia_{Tandem} = \frac{6\,198\,010}{61\,357\,128} \times 100 = 41,9\% \quad (B.11)$$

## Anexo B.6 – Exemplo de cálculo dos CEE's mensais das misturadoras

No exemplo de cálculo apresentado considera-se como referência a misturadora 0 (ML00).

Da **Figura 5.12** retira-se que o valor da energia elétrica consumida no mês de janeiro de 2022 pela misturadora 0, sendo esse valor igual a 895 tep. Da **Figura 5.13** retira-se que a produção de compostos de borracha na misturadora 0 durante o mesmo período ascendeu a 29 565 ton.

Assim o CEE, em tep/ton, da misturadora 0 relativo ao mês de janeiro de 2022 é dado pela **Equação B.12**:

$$CEE_{ML00} \left( \frac{tep}{ton} \right) = \frac{895}{29\,565} = 0,030 \quad (\text{B.12})$$

## Anexo B.7 – Distribuição do consumo de energia elétrica por tipo de equipamento presente na linha de misturação – Misturadoras *Tandem*

Através do MessDas foi possível recolher o consumo de energia elétrica, em kWh, durante ano de 2022 de cada equipamento presente nas linhas de misturação *Tandem*. Os resultados são apresentados na **Tabela B.4** assim como a respetiva contribuição percentual.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela B.4** - Consumo de Energia Elétrica, em kWh, e contribuição percentual dos equipamentos presentes nas linhas de misturação *Tandem* no ano de 2022

| Misturadoras Tandem   | Motores (kWh) | TSRD (kWh) | Auxiliares (kWh) | TCU's (kWh) |
|-----------------------|---------------|------------|------------------|-------------|
| <b>Misturadora 09</b> | 3 045 888     | 439 019    | 489 416          | 515 304     |
| <b>Misturadora 10</b> | 3 824 340     | 441 227    | 564 917          | 375 843     |
| <b>Misturadora 11</b> | 5 678 917     | 634 535    | 1 077 112        | 187 519     |
| <b>Misturadora 12</b> | 6 375 151     | 791 337    | 754 794          | 101 384     |
| <b>Total</b>          | 18 924 296    | 2 306 119  | 2 886 238        | 1 180 048   |
| <b>%</b>              | 74,8%         | 9,1%       | 11,4%            | 4,7%        |

Como exemplo de cálculo tome-se o consumo dos motores. A contribuição percentual dos consumos dos motores no consumo total da linha de misturação é dada pela **Equação B.13**.

$$\begin{aligned}
 \%Energia_{Motores\ Tandem} &= \frac{18\,924\,296}{18\,924\,296 + 2\,306\,119 + 2\,886\,238 + 1\,180\,048} \times 100 \\
 &= 74,8\%
 \end{aligned}
 \tag{B.13}$$

**Anexo B.8 – Ar comprimido**

- **Exemplo de cálculo do CEE dos compressores da Central de Negro de Fumo Antiga**

Para o exemplo de cálculo a seguir apresentado tomou-se como referência o compressor 1.

Da **Figura 5.17** retira-se que o valor da energia elétrica consumida, em kWh, no ano de 2022 é igual a 235 792 kWh. Da **Figura 5.18** retira-se que a produção de ar comprimido, em Nm<sup>3</sup>, durante o mesmo período ascendeu a 1 285 814.

Assim o CEE, em kWh/Nm<sup>3</sup>, no setor da misturação relativo ao compressor 1 da central de negro de fumo antiga no ano de 2022 é dado pela **Equação B.14**:

$$CEE_{Compressor\ 1} \left( \frac{kWh}{Nm^3} \right) = \frac{235\ 792}{1\ 285\ 814} = 0,183 \quad (\text{B.14})$$

- **Cálculo do CEE da Central de Negro de Fumo Antiga**

Da **Tabela 5.7** retira-se que o consumo de energia elétrica da Central de Negro de Fumo Antigo no ano de 2022, foi igual a 610 371 kWh. Este valor é o somatório do consumo individual de cada compressor nesta central durante o mesmo período de tempo. Estes valores encontram-se apresentados na **Figura 5.17**.

Da **Figura 5.18** é possível a extrair a produção de ar comprimido total, em Nm<sup>3</sup>, da Central de Negro de Fumo Antiga no ano de 2022 através do somatório da produção individual de cada compressor. Assim, este valor foi igual a 4 528 118 Nm<sup>3</sup>.

Posto isto, o CEE da Central de Negro de Fumo Antiga é dado pela **Equação B.15**.

$$CEE_{Central\ Antiga\ NF} \left( \frac{kWh}{Nm^3} \right) = \frac{610\ 371}{4\ 528\ 118} = 0,135 \quad (\text{B.15})$$

O CEE da Central de Ar de Comprimido de baixa pressão da CMIP no ano de 2022 foi igual a 0,104 kWh/Nm<sup>3</sup>, sendo este valor retirado diretamente do *MessDas*.

Assim, o desvio relativo percentual entre a Central de Negro de Fumo Antiga e a Central de Ar de Comprimido de baixa pressão da CMIP é dado pela **Equação B.16**.

$$\begin{aligned} \%Desvio_{centrais} &= \frac{CEE_{Central\ Antiga\ NF} - CEE_{Ar\ baixa\ CMIP}}{CEE_{Central\ Antiga\ NF}} \times 100 \quad (\text{B.16}) \\ &= 22,5\ \% \end{aligned}$$

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Como o custo unitário da energia elétrica na CMIP em 2022 foi igual a 0,24095 €/kWh (**Anexo A.1**), pode-se dizer que o custo energético de produção de ar comprimido pela Central de Negro de Fumo Antiga foi 33 137,84 € mais cara que a produção homóloga na Central de Ar de Comprimido de baixa pressão da CMIP. O desenvolvimento que levou ao cálculo do valor de 33 137, 84 € encontra-se desenvolvido nas **Equações B.17-A.20**.

$$\begin{aligned}
 \text{Custo específico}_{\text{Central Antiga NF}} \left( \frac{\text{€}}{\text{Nm}^3} \right) & \quad \text{(B.17)} \\
 &= CEE_{\text{Central Antiga NF}} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \right) \times \text{Custo unitário ELE} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \\
 &= 0,135 \times 0,24095 = 0,0325
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Custo específico}_{\text{Ar Baixa CMIP}} \left( \frac{\text{€}}{\text{Nm}^3} \right) & \quad \text{(B.18)} \\
 &= CEE_{\text{Ar Baixa CMIP}} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \right) \times \text{Custo unitário ELE} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \\
 &= 0,104 \times 0,24095 = 0,0252
 \end{aligned}$$

$$\Delta \text{Custo específico}_{\text{Ar comprimido}} \left( \frac{\text{€}}{\text{Nm}^3} \right) = 0,0325 - 0,0252 = 0,00732 \quad \text{(B.19)}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Custo total Desvio}_{\text{centrais}} (\text{€}) & \\
 &= \Delta \text{Custo específico}_{\text{Ar comprimido}} \left( \frac{\text{€}}{\text{Nm}^3} \right) \quad \text{(B.20)} \\
 &\times \text{Produção}_{\text{Central Antiga NF}} (\text{Nm}^3) = 33\,137,84
 \end{aligned}$$

## Anexo B.9 – Ventilação e Climatização

- Exemplo de cálculo da repartição do consumo de energia elétrica dos QGV's pelas UTA's, torres de arrefecimento da ventilação e ventiladores de extração.

O exemplo de cálculo que aqui se apresenta tem como referência a UTA 9. A UTA 9 está presente no QGV4.

Da **Tabela 5.12** retira-se que o consumo anual em 2022 do QGV4 ascendeu aos 654 505 kWh.

Considerando que o QGV4 têm um período de funcionamento médio de 9 meses ao ano (6480 horas), pode-se calcular a potência média anual através da **Equação B.21**.

$$P_{QGV4}(kW) = \frac{Energia_{QGV4}(kWh)}{horas\ funcionamento(h)} = \frac{654\ 505}{6480} = 101,0 \quad (B.21)$$

Tal como foi referido na **secção 5.2.1 – Ventilação e Climatização**, a distribuição dos consumos de energia elétrica da ventilação pelas UTA's, torres de arrefecimento e ventiladores de extração foi efetuada admitindo proporcionalidade entre a potência instalada no equipamento e o consumo de energia. Posto isto, o consumo anual de energia elétrica no ano de 2022 da UTA 9 pôde ser calculado através da expressão da **Equação B.22**.

$$\begin{aligned} Energia_{UTA\ 9}(kWh) &= \frac{P_{ventilador\ UTA\ 9}}{P_{QGV4}} \times Energia_{QGV3} \\ &= \frac{22,0}{101,1} \times 654\ 505 = 142\ 560 \end{aligned} \quad (B.22)$$

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

A mesma metodologia de cálculo foi adotada para as restantes UTA's, torres de arrefecimento e ventiladores de extração. No caso do QGV3 considerou-se igualmente um período médio de funcionamento de 9 meses e no caso do QGV5 considerou-se um tempo médio de funcionamento de 4 meses.

- **Exemplo de cálculo da repartição do consumo de vapor pelas UTA's e termoventiladores.**

O exemplo de cálculo que aqui se apresenta tem como referência a UTA 9. A potência térmica de aquecimento da UTA 9 pode-se extrair da **Tabela 5.14**, sendo esse valor igual a 430 kW.

O vapor é alimentado à bateria de aquecimento da UTA à pressão de 4 bar, pelo o valor do calor latente do vapor a essa pressão é igual a 2133,9 kJ/kg.

O caudal de vapor que circula na bateria de aquecimento da UTA 9 pode ser então calculado recorrendo-se à **Equação 5.1** presente na **secção 5.2.2**

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{\dot{q}_{UTA9}}{\Delta H_v} = \frac{430}{2133,9} \times 3600 = 725 \text{ kg/h}$$

**Anexo B.10 – CEE compostos de Borracha**

- **Cálculo do CEE das Utilidades**

Para calcular o CEE das utilidades consideraram-se os valores obtidos da energia consumida por estas e a produção total de compostos finais de borracha em 2022.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Da **Tabela B.2** do **Anexo B.4** retira-se o valor do consumo de energia elétrica anual, em 2022, relativa às utilidades (Ventilação, Ar comprimido, Óleos, ACS, QUG e Torres de Refrigeração), sendo o seu valor conjunto igual a 12 383 833 kWh.

Da **Tabela B.3** do **Anexo B.4** retira-se o valor do consumo anual de iluminação, em 2022, sendo igual a 1 759 760 kWh.

Da **Tabela B.1** do **Anexo B.1** retira-se o valor do consumo anual de vapor em 2022, sendo esse valor igual a 4 155 510 kWh.

A produção de compostos finais de borracha, em 2022, ascendeu aos 193 670 ton. Este valor deriva da soma da produção mensal que se encontra presente na **Figura 5.7**.

Assim, o CEE das utilidades pode ser calculado através da expressão da **Equação B.23**.

$$\begin{aligned}
 CEE_{Utilidades} &= \frac{Energia\ Utilidades_{ELE}(kWh) + Energia_{Vapor\ mixing}(kWh) + Energia\ Iluminação(kWh)}{Produção\ Compostos\ Finais\ (ton)} \\
 &= 94,5\ kWh/ton
 \end{aligned}$$

(B.23)

- Exemplo de cálculo do CEE – Compostos de Borracha

Para este exemplo de cálculo considere-se o **composto B**.

Da ferramenta “*Product Profiler*” extraiu-se os CEE’s médios dos dias 17,18,19,20,21 e 22 e posteriormente calculou-se o CEE médio do período, tal como se apresenta na **Tabela B.5**.

**Tabela B.5** - CEE's médios diários para o composto B entre 17 e 22 de junho de 2023

| Composto B            | Dia 17 | Dia 18 | Dia 19 | Dia 20 | Dia 21 | Dia 22 | CEE Médio Período |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| CEE - FMF -Composto B | 75,4   | 74,4   | 80,1   | 69,4   | 66,7   | 66,8   | 76,6              |
| CEE - M1 - Composto B | 91,8   | 104,5  | 96,0   | -      | 78,1   | -      | 97,4              |
| CEE - Composto B      | 167,3  | 178,9  | 176,1  | -      | 144,8  | -      | 166,8             |

O CEE de cada dia é a soma do CEE referente ao passo de misturação FMF com o passo M1.

Ao CEE médio período falta somar o CEE das utilidades, pelo que, o CEE total para o composto B é dado pela **Equação A.36**.

$$CEE_{total_{composto\ B}} = 166,8 + 94,5 = 261,2 \text{ kWh/ton} \quad (\text{A.36})$$

## Anexo C – Otimização Energética Setor da Misturação

### Anexo C.1 – Avaliação da redução do CEE de compostos de borracha – Master Batch + Final Mix vs OSM

- Cálculo da poupança por tonelada - MB+FM vs OSM

Da **Tabela 6.1** retira-se que o CEE médio relativo aos compostos de sílica produzidos em regime MB+FM apresenta o valor de 233,5 kWh/ton e em regime OSM igual 136,5.

Sabendo que o custo médio da energia elétrica na CMIP é igual a 0,15680 €/kWh então o custo por tonelada, para ambos os regimes, é dado pelas **Equação C.1** e **C.2**, respetivamente.

(A.37)

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

$$\begin{aligned}
 \text{Custo tonelada}_{MB+FM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) &= CEE_{MB+FM} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \right) \times \text{Custo médio ELE} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \\
 &= 233,5 \times 0,15680 = 36,6
 \end{aligned} \tag{C.1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Custo tonelada}_{OSM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) &= CEE_{OSM} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \right) \times \text{Custo médio ELE} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \\
 &= 136,5 \times 0,15680 = 21,4
 \end{aligned} \tag{C.2}$$

Assim, a poupança alcançada por tonelada quando se compara a produção em MB+FM com a produção em OSM é representada pela **Equação C.3**.

$$\begin{aligned}
 \text{Poupança tonelada}_{MB+FM \text{ vs } OSM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) &= \text{Custo tonelada}_{MB+FM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) \\
 &\quad - \text{Custo tonelada}_{OSM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) = 15,2
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

- **Exemplo de cálculo da poupança do custo da energia elétrica pelo aumento da produção em OSM face à produção em MB+FM**

$$\text{Produção}_{MB+FM} = 325,7 \text{ ton}$$

$$\text{Custo tonelada}_{MB+FM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) = 36,6$$

$$\text{Produção}_{OSM} = 325,7 \text{ ton}$$

$$\text{Custo tonelada}_{OSM} \left( \frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) = 21,4$$

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Para a situação inicial o custo total da energia elétrica associada à produção em ambos os regimes é dado pela **Equação C.4**.

$$\begin{aligned} \text{Custo total } ELE_{\text{situação atual}}(\text{€}) &= (325,7 \times 36,6) + (24,3 \times 21,4) \\ &= 12\,442,61 \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

Para efeitos dos processo de otimização considerou-se que a produção total se manteria constante e igual a 350 ton.

Se se pretender aumentar a produção em OSM para 40% da produção total a produção em MB+FM reduzir-se-á para 60%. Assim, pelas **Equações C.5 e C.6**, obtém-se:

$$\text{Produção } OSM_{40\%} = 0,40 \times 350 = 140,0 \quad (\text{C.5})$$

$$\text{Produção } MB + FM_{60\%} = 0,60 \times 350 = 210,0 \quad (\text{C.6})$$

Assim, o custo total da energia elétrica associada à produção para esta nova situação pode ser calculada pela **Equação C.7**.

$$\begin{aligned} \text{Custo Total } ELE_{\text{otimizada}}(\text{€}) &= (210,0 \times 36,6) + (140,0 \times 21,4) \\ &= 10\,683,27 \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

A poupança anual alcançada para a situação 60% MB+FM/40% OSM calcula-se pela **Equação C.8**.

$$\begin{aligned} \text{Poupança anual } ELE_{60\% \text{ MB+FM vs } 40\% \text{ OSM}}(\text{€}) \\ &= 12\,442,61 - 10\,683,27 = 1\,759,4 \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

## Anexo C.2 – Otimização de transformadores – Medida 1

- **Exemplo de cálculo do fator de carga médio**

Para este exemplo de cálculo considere-se o transformador 2.2.

Da **Tabela 6.4** retira-se o valor da potência nominal do transformador 2.2, sendo igual a 2500 kVA.

Da **Tabela 6.5** retira-se o valor da potência média do transformado 2.2, sendo igual a 710 kW. Este valor foi retirado do diagrama de carga para este transformador.

Assim, o fator de carga do transformador 2.2 é dado pela aplicação da **Equação 6.3**.

$$\% Fator Carga_{2.2} = \frac{710}{2500} \times 100 = 28,4 \%$$

- **Exemplo de cálculo das potências das perdas totais de energia elétrica antes e após a otimização dos transformadores**

As perdas em vazio e de carga dos transformadores foram estimadas com base na informação presente em catálogos da empresa Schneider Eletric e/ou da empresa EFACEC para transformadores de distribuição de tipo seco 15kV/400V semelhantes aos encontrados no setor da misturação. Nas **Figuras C.1 e C.2** apresentam-se os referidos catálogos.

Para a apresentação do exemplo de cálculo considere-se os transformadores 2.2 e 2.3, ambos fabricados pela empresa fFranceTransfo que atualmente pertence à Schneider Eletric com uma potência nominal de 2500 kVA.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

## Trihal - Cast Resin Transformer

Up to 3150 kVA - 17.5 kV - C4 E4 F1 5pC\*\* - BIL 1

## Main electrical characteristics

| Power kVA                       | 160                                                     | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Primary voltage                 | 15 kV                                                   |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| Secondary voltage               | 400 V between phases (at no load)                       |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| HV insulation level             | 17.5 kV BIL 1 ( 75 / 38 kV)                             |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| HV tapping range                | +/- 2.5% and/or +/- 5%                                  |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| Vector group                    | Dyn 11, Dyn 5, Dyn 1 (other vector groups upon request) |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| No-load losses (w)              | 360                                                     | 468  | 558  | 675  | 811  | 990  | 1170 | 1395 | 1620  | 1980  | 2340  | 2790  | 3420  |
| Load losses at 120°C (w)        | 2600                                                    | 3400 | 3876 | 4500 | 5630 | 7100 | 8000 | 9000 | 11000 | 13000 | 16000 | 19000 | 22000 |
| Impedance voltage (%)           | 6                                                       | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     |
| Acoustic Level dB(A):           |                                                         |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| - power L <sub>WA</sub>         | 53                                                      | 56   | 58   | 59   | 60   | 61   | 63   | 64   | 66    | 67    | 69    | 70    | 73    |
| - pressure L <sub>PA</sub> (1m) | 41                                                      | 44   | 45   | 46   | 47   | 48   | 50   | 50   | 52    | 53    | 55    | 55    | 58    |

**Figura C.1** - Informação das perdas em vazio e em carga de transformadores de distribuição do tipo seco 15kV/400V Schneider Eletric [42]

Tensão mais elevada  
Highest voltage

17,5 kV

| Potência / Rated power (kVA)                                 |   | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  |
|--------------------------------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Perdas em vazio / No-load losses                             | W | 880  | 1000 | 1200 | 1400 | 1650 | 1950 | 2300  | 2700  | 3100  | 3650  | 5000  |
| Perdas em carga / Load losses                                | W | 3800 | 4600 | 5500 | 6400 | 7800 | 8500 | 11000 | 11500 | 13000 | 17000 | 19000 |
| Tensão curto-circuito / Impedance voltage                    | % | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     |
| Potência sonora / Sound power level (L <sub>WA</sub> ) dB(A) |   | 70   | 73   | 73   | 75   | 75   | 76   | 78    | 79    | 79    | 81    | 81    |

Tensão mais elevada  
Highest voltage

24 kV

|                                                              |   |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Perdas em vazio / No-load losses                             | W | 880  | 1000 | 1200 | 1400 | 1650 | 1950 | 2300  | 2700  | 3100  | 3650  | 5000  |
| Perdas em carga / Load losses                                | W | 3800 | 4600 | 5500 | 6400 | 7800 | 8500 | 11000 | 11500 | 13000 | 17000 | 19000 |
| Tensão curto-circuito / Impedance voltage                    | % | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     |
| Potência sonora / Sound power level (L <sub>WA</sub> ) dB(A) |   | 65   | 65   | 68   | 70   | 70   | 73   | 73    | 76    | 76    | 76    | 81    |

**Figura C.2** - Informação das perdas em carga e em vazio de transformadores tipo seco 15kV/400V da EFACEC

Da **Tabela 6.5** retira-se que o fator de carga medio dos transformadores 2.2 e 2.3 são iguais a 28,4% e 22,8%, respetivamente.

Observando a **Figura C.1**, constata-se que para uma potência nominal de 2500 kVA as perdas em vazio e em carga são iguais a 2,79 kW e 19,0 kW, respetivamente.

Com base na **Equação 6.5** torna-se então possível calcular a potência total das perdas de energia elétrica, tanto para o transformador 2.2 como para o transformador 2.3.

$$P_{perdas\ 2.2} = 2,79 + (0,284)^2 \times 19,0 = 4,32\ kW$$

$$P_{perdas\ 2.3} = 2,79 + (0,228)^2 \times 19,0 = 3,77\ kW$$

A potência das perdas dos transformadores 2.2 e 2.3 em conjunto ascende assim a 8,10 kW.

Sabendo que o custo médio da energia elétrica na CMIP é igual a 0,15680 €/kWh foi possível calcular o custo anual referente às perdas verificadas para o conjunto dos transformadores 2.2 e 2.3 na situação atual, estando o cálculo representado na **Equação C.9**.

$$\begin{aligned} &Custo\ anual\ perdas_{situação\ atual}(\text{€}) \\ &= P_{perdas\ 2.2+2.3}(kW) \times 8760 \left( \frac{h}{ano} \right) \\ &\times\ Custo\ médio\ ELE \left( \frac{\text{€}}{kWh} \right) \\ &= 8,10 \times 8760 \times 0,15680 = 11\ 121,36 \end{aligned} \quad (C.9)$$

A medida de otimização proposta pretende transferir inteiramente os utilizadores de um dos transformadores para o outro permitindo assim desligar-se um deles. Recorrendo ao *MessDas* foi possível extrair o diagrama de carga onde se contabilizou a contribuição de ambos os transformadores. Nesta situação a potência média da soma dos transformadores 2.2 e 2.3 atingiu os 1297 kW.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Com este valor de potência média calculou-se o fator de carga para o transformador que não se desliga. Assim recorrendo-se novamente à **Equação 6.3**, calculou-se o o fator de carga para a situação otimizada, sendo o valor igual a 51,9%.

Desta feita, procedeu-se ao cálculo das perdas de energia para esta nova situação, recorrendo novamente à **Equação 6.5**. Repara-se que as perdas em vazio pertencem a apenas um dos transformadores (2,79 kW) e as perdas em carga serão ponderadas pelo novo fator de carga.

$$P_{\text{perdas após otimização}} = 2,79 + (0,519)^2 \times 19,0 = 7,90 \text{ kW}$$

Tendo agora o conhecimento das perdas de energia para a situação otimizada, torna-se possível calcular o custo anual projetado associado a estas perdas. O cálculo encontra-se representado na **Equação C.10**.

$$\begin{aligned} \text{Custo anual perdas}_{\text{situação otimizada}} (\text{€}) &= P_{\text{perdas após otimização}} (\text{kW}) \times 8760 \left( \frac{h}{\text{ano}} \right) \\ &\times \text{Custo médio ELE} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \\ &= 7,90 \times 8760 \times 0,15680 = 10\,852,97 \end{aligned} \quad (\text{C.10})$$

Tendo o custo referente às perdas de energia elétrica antes e após a otimização efetuada, foi possível calcular a poupança anual obtida, tal como se demonstra na **Equação C.11**.

$$\text{Poupança anual perdas} (\text{€}) = 11\,121,36 - 10\,852,97 = 268,39 \quad (\text{C.11})$$

### Anexo C.3 – Otimização de transformadores – Medida 2

- **Determinação da potência nominal mínima dos transformadores que substituem os transformadores 10.1 e 10.2**

Segundo a prática industrial é comum dimensionar-se transformadores elétricos de forma a que a potência máxima nunca superior a 80% (fator de demanda) da potência nominal do transformador. Para esta análise considerou-se que ambos os novos transformadores devem possuir a mesma potência nominal de modo a não sobrecarregar um deles em detrimento do outro.

Em 2022, as potências máximas registadas para os transformadores 10.1 e 10.2 foram iguais a 949 kW e 1150 kW, respetivamente.

Para primeira análise escolheu-se uma potência nominal dos novos transformadores de 1250 kVA.

Considerando a potência máxima registada se mantém constante os fatores de demanda dos transformadores que substituem os transformadores 10.1 e 10.2 podem ser calculados pela **Equação C.12 e C.13**, respetivamente.

$$\% \text{ Fator Demanda}_{\text{substituto } 1250 \text{ kVA} - 10.1} = \frac{949}{1250} \times 100 = 75,9\% \quad (\text{C.12})$$

$$\% \text{ Fator Demanda}_{\text{substituto } 1250 \text{ kVA} - 10.2} = \frac{1150}{1250} \times 100 = 92,0\% \quad (\text{C.13})$$

Como o fator de demanda do transformador com uma potência nominal do novo transformador que iria substituir o transformador 10.2 é superior a 80%, logo descartou-se o valor de 1250 kVA para potência nominal dos transformadores.

O nível seguinte de potência nominal é igual a 1600 kVA. Nesta situação os fatores de demanda ficam:

$$\% \text{ Fator Demanda}_{\text{substituto } 1600 \text{ kVA} - 10.1} = \frac{949}{1600} \times 100 = 59,3\%$$

$$\% \text{ Fator Demanda}_{\text{substituto } 1600 \text{ kVA} - 10.2} = \frac{1150}{1250} \times 100 = 71,9\%$$

Como pelo menos um dos fatores de demanda dos novos transformadores é inferior a 80%, logo selecionou-se a potência nominal de 1600 kVA.

- **Análise Económica – Substituição dos transformadores 10.1 e 10.2 por transformadores com potência nominal de 1600 kVA**

Os transformadores de 1600 kVA (15kV/400V) que se averiguou para substituir os transformadores são fabricados pela *Schneider Eletric*, modelo *Trihal dry-type*. A ficha técnica deste tipo de transformadores encontra-se representada na **Figura C.3 e C.4**.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

## Product data sheet

Specifications



**Transformer, Trihal, Tier2, dry type,  
1600kVA, 15kV, 400V, 17,5kV, IP00**

TRI160017K2A3YPD1

| Main                      |                                         |
|---------------------------|-----------------------------------------|
| Product range             | Trihal                                  |
| Product or component type | Transformer                             |
| Transformer type          | Dry type transformer                    |
| Network type              | AC                                      |
| Type of installation      | Indoor                                  |
| Maximum altitude          | 1000 m                                  |
| Cooling mode              | AN (air natural)                        |
| Winding material          | Aluminium                               |
| Insulation material       | Pre-impregnated (LV)<br>Cast resin (HV) |
| Degree of protection      | IP00                                    |
| Mounting mode             | Ground mounted                          |

| Complementary                                            |                                                          |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Phase                                                    | 3 phases                                                 |
| Rated power                                              | 1600 kVA                                                 |
| Rated frequency                                          | 50 Hz                                                    |
| Rated primary voltage                                    | 15 kV                                                    |
| Secondary voltage ( at no-load)                          | No load: 400 V                                           |
| Insulation voltage to industrial frequency ( 50 Hz 1 mn) | 17.5 kV AC primary<br>1.1 kV AC secondary                |
| Rated insulation level                                   | Primary circuit: 38 kV AC<br>Secondary circuit: 10 kV AC |
| Lighting impulse withstand voltage ( BIL ) , 1.2/50 µs   | 95 kV                                                    |
| Vector group                                             | Dyn11                                                    |
| HV tapplings (off circuit)                               | +/- 2 x 2.5 %                                            |
| Short circuit impedance                                  | 6 %                                                      |
| No-load losses                                           | 1980 W                                                   |
| Load losses at 75°C/120 °C                               | 13000 W at 120 °C                                        |
| Temperature rise of windings                             | 100 K                                                    |

Jun 29, 2023
Like On 
1

Disclaimer: This documentation is not intended as a substitute for and must not be used for determining suitability or reliability of these products for specific user applications.

Figura C.3 - Ficha Técnica do transformador Trihal dry-type 1600 kVA (15kV/400V) - Parte 1 [44]

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

|                                       |                                                               |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Thermal class                         | F                                                             |
| Sound power level                     | 53 dB at 1 m                                                  |
| Electrical connection                 | Cable high voltage connection<br>Cable low voltage connection |
| Protective relay                      | protection relay T-154                                        |
| Height                                | 1970 mm                                                       |
| Width                                 | 950 mm                                                        |
| Length                                | 1770 mm                                                       |
| Total weight                          | 3498 kg                                                       |
| <b>Environment</b>                    |                                                               |
| Ambient air temperature for operation | -25...40 °C for C2                                            |
| Ambient air temperature for storage   | -50...40 °C C4                                                |
| Environmental certification           | 0...95 % (E4)                                                 |
| Fire certificate                      | F1                                                            |
| Standards                             | EN 50588-1                                                    |
| Corrosion category                    | C4                                                            |
| <b>Offer Sustainability</b>           |                                                               |
| EU RoHS Directive                     | Not applicable, out of EU RoHS legal scope                    |
| <b>Recommended replacement(s)</b>     |                                                               |

**Figura C.4** - Ficha técnica do transformador Trihal dry-type 1600 kVA (15kV/400V) – Parte 2 [44]

O custo de aquisição de cada transformador *Trihal dry-type* 1600 kVA (15kV/400V) situa-se em 78 580,00 € (**Figura C.5**)



**TRIHAL 1600kVA 15kV/400V 17,5kV IP00 TIER2**  
 TRI160017K2A3YPD1

[Adicionar a Os meus produtos](#)
☐ Comparar

**78.580,00 EUR**

[Encontrar um revendedor](#)

[Suporte Comercial](#)
[Registe-se na newsletter](#)

**Figura C.5** – Custo de aquisição do transformador Trihal dry-type 1600 kVA (15kV/400V) [44]

Visto que se pretendem adquirir 2 transformadores, o custo total ascende aos 157 160,00 €.

Da **Figura C.3** é possível extrair que a potência das perdas em vazio para o transformador *Trihal dry-type* 1600 kVA (15kV/400V) são iguais a 1,98 kW e as perdas em carga, para um funcionamento à potência nominal de 1600 kVA, igual a 13,0 kW.

O fator de carga médio dos novos transformadores foi calculado mantendo a potência média inicial dos transformadores 10.1 (606 kW) e 10.2 (617 kW). Recorrendo novamente à **Equação 6.3**.

$$\% Fator Carga_{substituto\ 1600\ kVA-10.1} = \frac{606}{1600} = 36,8\%$$

$$\% Fator Carga_{substituto\ 1600\ kVA-10.2} = \frac{617}{1600} = 37,9\%$$

Tendo os valores dos fatores de carga dos novos transformares que substituem os transformadores 10.1 e 10.2, torna-se possível calcular a potências das perdas totais de energia elétrica para esta nova situação (**Equações C.14 e C.15**).

$$P_{perdas\ substituto\ 1600\ kVA-10.1} = 1,98 + (0,368)^2 \times 13,0 = 3,91\ kW \quad (C.14)$$

$$P_{perdas\ substituto\ 1600\ kVA-10.2} = 1,98 + (0,379)^2 \times 13,0 = 3,84\ kW \quad (C.15)$$

As perdas, em conjunto, dos dois novos transformadores de 1600 kVA fica assim igual a 7,76 kW.

O tempo de vida médio de um transformador de distribuição do tipo seco onde estejam asseguradas as condições adequadas de ventilação, humidade e poeira é superior a 25 anos. Assim, para a situação de análise que se desenvolverá a partir deste ponto considera-se que um tempo de vida médio dos transformadores de 1600 kVA considerados igual 30 anos.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Para o cálculo do custo associado às perdas dos transformadores considerou-se uma taxa de capitalização do custo da energia elétrica igual a 2%. Mais uma vez, o custo inicial para a energia elétrica considerou-se o valor de 0,15680 €/kWh.

Posto isto, o custo projetado relativo às perdas dos transformadores de 1600 kVA durante um tempo médio de vida de 30 anos foi calculado a partir da **Equação C.16**.

$$\begin{aligned}
 &Custo_{perdas_{Transformadores\ 1600\ kVA}} (\text{€}) \\
 &= P_{perdas\ substituto\ 1600\ kVA-10.1+10.2} (kW) \\
 &\times 8760 \left( \frac{h}{ano} \right) \times B \times Custo_{ELE} (\text{€}) \quad (C.16) \\
 &= 7,76 \times 8760 \times \frac{1 - \left( \frac{1}{1 + 0,02} \right)^{30}}{0,02} \times 0,15680 \\
 &= 238\ 661,52
 \end{aligned}$$

Passando agora para o cálculo do custo das perdas atuais dos transformadores 10.1 e 10.2, retira-se da Tabela 6.6 que o valor da potência das perdas para estes transformadores é igual a 12,27 kW.

Os transformadores 10.1 e 10.2 foram instalados em 2013, pelo que considerando que terão igualmente um tempo de vida médio de 30 anos significa que restam 20 anos de operação.

Assim, o custo da soma das perdas referentes aos transformadores 10.1 e 10.2 podem ser calculadas pela expressão representada na **Equação C.17**.

$$\begin{aligned}
 &Custo_{perdas_{atuais-10.1+10.2}} (\text{€}) \\
 &= P_{perdas\ atuais-10.1+10.2} (kW) \times 8760 \left( \frac{h}{ano} \right) \times B \times Custo_{ELE} (\text{€}) \\
 &= 12,27 \times 8760 \times \frac{1 - \left( \frac{1}{1 + 0,02} \right)^{20}}{0,02} \times 0,15680 = 275\ 664,74
 \end{aligned} \quad (C.17)$$

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

A poupança alcançada pode ser obtida pela diferença entre a **Equação C.17** e a **Equação C.16**, dando origem assim à **Equação C.18**.

$$Poupança (€) = 275\,664,74 - 238\,661,52 = 37\,003,22 \quad (\text{C.18})$$

Finalmente o cálculo do PRI é dado pelo quociente entre investimento requerido e a poupança alcançada (**Equação C.19**).

$$PRI \text{ (anos)} = \frac{\text{Investimento (€)}}{\text{Poupança (€)}} = \frac{157\,160,00}{37\,003,22} = 4,25 \quad (\text{C.19})$$

## Anexo C.4 – Aproveitamento do calor residual dos condensados sujos para descongelamento de borracha

### • Cálculo da capacidade da sala aquecida

A capacidade da sala foi determinada tendo em conta as quantidade de borracha que a CMIP processa em cada dia e as características das paletes GoodPack™. Na **Figura C.6**, é possível visualizar as características das paletes GoodPack™.

| Technical Specifications:       |                                                            |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Dimensions (external)           | 1,465 × 1,150 × 1,098 (mm, L × W × H)                      |
| Dimensions (internal)           | 1,437 × 1,090 × 1,020 (mm, L × W × H)                      |
| Dimensions (collapsed)          | 1,465 × 1,150 × 181 (mm, L × W × H)                        |
| Volume (internal)               | 1.60 m <sup>3</sup> (422 US gallon, 56.5 ft <sup>3</sup> ) |
| Tare weight                     | 132 ± 4 kg (291 ± 9 lb)                                    |
| Maximum payload                 | 1,650 kg (3,637 lb)                                        |
| Forklift handling               | 4-way entry                                                |
| Tracking                        | RFID tag (chip and bar code) and 2D serial number          |
| Special features                | removable sidewall                                         |
| Stackable in warehouse*         | 5 (laden)                                                  |
| Max. weight on lowest container | 7,200 kg (15,873 lb)                                       |
| Stackable in transit*           | 2 (laden)                                                  |
| Quantity in 20 ft ISO**         | 16 (laden), 96 (collapsed)                                 |
| Quantity in 40 ft ISO**         | 32 (laden), 192 (collapsed)                                |
| Quantity in 40 HC ft ISO**      | 208 (collapsed)                                            |
| Construction                    | all-welded steel frame with collapsible walls              |
| Material                        | galvanized steel frame, Galvalume® sidewalls               |

**Figura C.6** - Características das paletes GoodPack™ [32]

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

Pela **Figura C.6**, verifica-se que as paletes possuem como dimensões externas um comprimento (C) igual a 1,465 m, uma largura (L) igual a 1,150 m e uma altura (h) igual a 1,098. A carga que cada palete é passível de transportar é igual a 1,65 ton.

Assim, o volume de cada palete pode ser determinado através da **Equação C.20**.

$$V_{palete}(m^3) = C \times L \times h = 1,465 \times 1,150 \times 1,098 = 1,85 \quad (C.20)$$

A quantidade de borracha que é processada na CMIP por dia, segundo dados de 2022, foi igual a 100 ton/dia. Sabendo que cada palete contém 1,65 ton de borracha pode-se determinar o número de paletes que equivalem à quantidade de 100 ton/dia (**Equação C.21**).

$$\#_{palete/dia} = \frac{\dot{m}_{borracha}}{m_{palete}} = \frac{100}{1,65} \approx 61 \quad (C.21)$$

A capacidade da sala acondicionada para se proceder ao descongelamento da borracha é dada então pelo produto entre o número de paletes processadas em cada dia e o respetivo volume de cada palete (**Equação C.22**). Aplica-se igualmente um fator de não ocupação de 25% de modo a facilitar o acesso à sala e que se podem empilhar no máximo até 3 paletes.

$$V_{sala} = \#_{palete/dia} \times V_{palete}(m^3) = 61 \times 3 \times 1,85 \times (1 + 0,25) = 420 m^3 \quad (C.22)$$

Para volume de 420 m<sup>3</sup> significa que as dimensões da sala podem ser as seguintes: (12 m x 7 m x 5 m – C x L x h).

A área total da sala pode ser então calculada pela aplicação da **Equação C.23**, apresentando um valor igual a 274 m<sup>2</sup>.

$$A_{total}(m^2) = 12 \times 7 + 2 \times 12 \times 5 + 2 \times 7 \times 5 = 274 \quad (C.23)$$

- **Cálculo das necessidades térmicas da sala aquecida**

Da secção 6.3 já se referiu que a borracha necessitará de ser aquecida de -10 °C até 15 °C. Para a capacidade calorífica da borracha tomou-se o valor de 0,450 kJ/kg.K [35].

Aplicando a **Equação 6.9** determina-se então a potência térmica necessária para realizar o aumento de temperatura da borracha referido anteriormente.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{borracha}(kW) &= \dot{m}_{borracha} \left( \frac{ton}{dia} \right) \times \left( \frac{1000}{3600 \times 24} \right) \left( \frac{kg}{ton} \right) \\ &\times C_{p_{borracha}} \left( \frac{kJ}{kg.K} \right) \times (T_f - T_i)(^{\circ}C) \\ &= 100 \times \left( \frac{1000}{3600 \times 24} \right) \times 0,450 \times (15 - (-10)) = 13 \end{aligned}$$

A estimativa da potência térmicas das perdas que poderão ocorrer na sala acondicionada foram determinadas pela **Equação 6.10**.

A partir do Manuel SCE – Manual Técnico para Avaliação do Desempenho Energético de Edifícios é possível extrair valores típicos das resistências de convecção interior ( $R_{Si}$ ) e exterior ( $R_{Se}$ ) quando existe transferência de calor superficial em elementos opacos. Assim, na **Tabela C.1** apresentam-se os valores considerados pelo manual considerado.

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

**Tabela C.1** - Resistências de convecção interior e exterior de transferência de calor em elementos opacos

| Sentido do Fluxo de calor |             | Resistência Térmica [(m <sup>2</sup> .° C)/W] |                                                                  |
|---------------------------|-------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                           |             | Exterior<br>R <sub>se</sub>                   | Interior ou face exterior<br>em contacto com ENU R <sub>si</sub> |
| Horizontal                |             | 0,04                                          | 0,13                                                             |
| Vertical                  | Ascendente  | 0,04                                          | 0,10                                                             |
|                           | Descendente |                                               | 0,17                                                             |

Considerando-se que o fluxo da perda de calor se dá apenas unidirecionalmente no sentido horizontal e as paredes da sala aquecida são materiais opacos o valor da  $R_{Si}$  assumiu-se como sendo igual a 0,13 m<sup>2</sup>.K/W e o valor da  $R_{Se}$  igual a 0,04 m<sup>2</sup>.K/W.

As paredes dos edifícios da CMIP foram construídos em alvenaria com espessuras entre os 20 e os 30 cm. Tendo em conta esta informação o valor da resistência à condução ao longo da espessura da parede extraiu-se novamente do Manual SCE sendo esse valor igual a 0,49 m<sup>2</sup>.K/W.

Com a informação das resistências à transferência de calor tanto por condução como por radiação, torna-se possível estimar a potência térmica correspondente às perdas que ocorrem na sala aquecida considerando-se que as perdas encontram-se à mesma temperatura que a sala (45 °C) e que a temperatura exterior é igual a 5 °C.

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{perdas} (kW) &= A_{total\ sala} (m^2) \times \frac{T_{sala} - T_{\infty}}{(R_{Si} + R_{cond} + R_{Se})} \left( \frac{W}{m^2} \right) \\
 &= \frac{\left( 274 \times \frac{45 - 5}{0,13 + 0,49 + 0,04} \right)}{1000 \left( \frac{W}{kW} \right)} = 16,6
 \end{aligned}$$

Finalmente as necessidades térmicas totais da sala aquecida são dadas pela soma entre a potência térmica para descongelar a borracha a potência das perdas térmicas, sendo esse valor igual a 29,6 kW.

- **Verificação da viabilidade energética do sistema**

De modo que o sistema proposto seja viável em termos energéticos a potência térmica cedida pelos condensados sujos tem que suprir as necessidades térmicas da sala acondicionada com as paletes de borracha (**Equação 6.11**).

Da **Tabela 6.9** sabe-se que o caudal volumétrico da corrente de condensados sujos é igual a 6,77 m<sup>3</sup>/h e que este estão disponíveis à temperatura de 78 °C. Para a realização deste cálculo considerou-se que a massa volúmica da água igual a 1000 kg/m<sup>3</sup> e uma capacidade calorífica de 4,18 kJ/kg.K. Admitindo uma variação de 10 °C na corrente dos condensados, determina-se a potência cedida no permutador:

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{\text{condensados sujos}} \text{ (kW)} &= \dot{V}_{\text{condensados sujos}} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \times 3600 \left( \frac{\text{segundos}}{\text{hora}} \right) \times \rho_{\text{H}_2\text{O}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \\
 &\times C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \times \Delta T_{\text{condensados}} (\text{°C}) \\
 &= 6,77 \times 3600 \times 1000 \times 4,18 \times 10 = 78,6
 \end{aligned}$$

Como a potência cedida pelos condensados (78,6 kW) é superior às necessidades térmicas da sala (29,6 kW), logo o sistema é viável sob o ponto de vista energético.

- **Cálculo do caudal de água descalcificada**

Para a realização deste cálculo admite-se que água descalcificada entra no permutador a uma temperatura igual a 20 °C e sai deste à temperatura de 58 °C.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\dot{q}_{\text{condensados sujos}} \text{ (kW)}}{C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \times \Delta T_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{78,9}{4,18 \times (58 - 20)} = 0,50 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cong 1,80 \text{ m}^3/\text{h}$$

## Auditoria Energética ao Processo de Misturação

- Dimensionamento do permutador de calor – Alfa Laval ALSHE LT 4L™

# Spiral Heat Exchanger

## Specification

**Modelo** : ALSHE LTL 4L  
**Item** : Mabor - Permutador espiral

**Data** : 21/06/2023

|                                  |           | <b>Lado Quente (A)</b> | <b>Lado frio (B)</b> |
|----------------------------------|-----------|------------------------|----------------------|
| Fluido                           |           | Água                   | Água                 |
| Densidade                        | kg/m³     | 975.5                  | 991.2                |
| Capacidade calorífica específica | kJ/(kg·K) | 4.18                   | 4.18                 |
| Conductividade Térmica           | W/(m·K)   | 0.664                  | 0.629                |
| Viscosity inlet                  | cP        | 0.362                  | 1.01                 |
| Viscosity outlet                 | cP        | 0.414                  | 0.480                |
| Volume flow rate                 | m³/h      | 7.0                    | 1.8                  |
| Temperatura de entrada           | °C        | 78.0                   | 20.0                 |
| Temperatura de saída             | °C        | 68.0                   | 57.9                 |
| Perda de carga                   | kPa       | 3.63                   | 0.312                |

### Heat transfer

|                               |    |                 |
|-------------------------------|----|-----------------|
| Calor Trocado                 | kW | 79.05           |
| Direcção relativa dos fluídos |    | Contra-corrente |
| L.M.T.D.                      | K  | 32.0            |

### Construction

|                   |    |                           |
|-------------------|----|---------------------------|
| Cylindrical width | mm | 400                       |
| Outer diameter    | mm | 480                       |
| Material da placa |    | 316/316L Dual certif      |
| Connection size   |    | ND 80->ND 80 ND 80->ND 80 |

|                                  |           |                           |
|----------------------------------|-----------|---------------------------|
| Código de pressão                |           | ASME - PED, CE mark cat 0 |
| Flange standard                  | EN        | EN                        |
| Design overpressure              | bar       | 3.0                       |
| Temperatura de projecto          | °C        | 80                        |
| Minimum Design Metal Temperature | °C        | -10                       |
| Fluid danger                     | Dangerous | No Danger,                |

According to the new regulation PED 2014/68/EU related to Classification and Labelling of Chemicals, Seller should ensure that end user evaluate and provide the information regarding hazardousness of the fluids to the manufacturer.

|                        |    |           |
|------------------------|----|-----------|
| Weight empty/operating | kg | 290 / 350 |
|------------------------|----|-----------|

Performance is conditioned on the accuracy of customers data and customers ability to supply equipment and products in conformity therewith.

Data, specifications, and other kind of information of technological nature set out in this document and submitted by Alfa Laval to you (Proprietary Information) are intellectual proprietary rights of Alfa Laval. The Proprietary Information shall remain the exclusive property of Alfa Laval and shall only be used for the purpose of evaluating Alfa Laval's quotation. The Proprietary Information may not, without the written consent of Alfa Laval, be used or copied, reproduced, transmitted or communicated or disclosed in any other way to a third party.

Figura C.7 - Projeto do permutador de calor ALSHE LTL 4L™ - Alfa Laval

Auditoria Energética ao Processo de Misturação

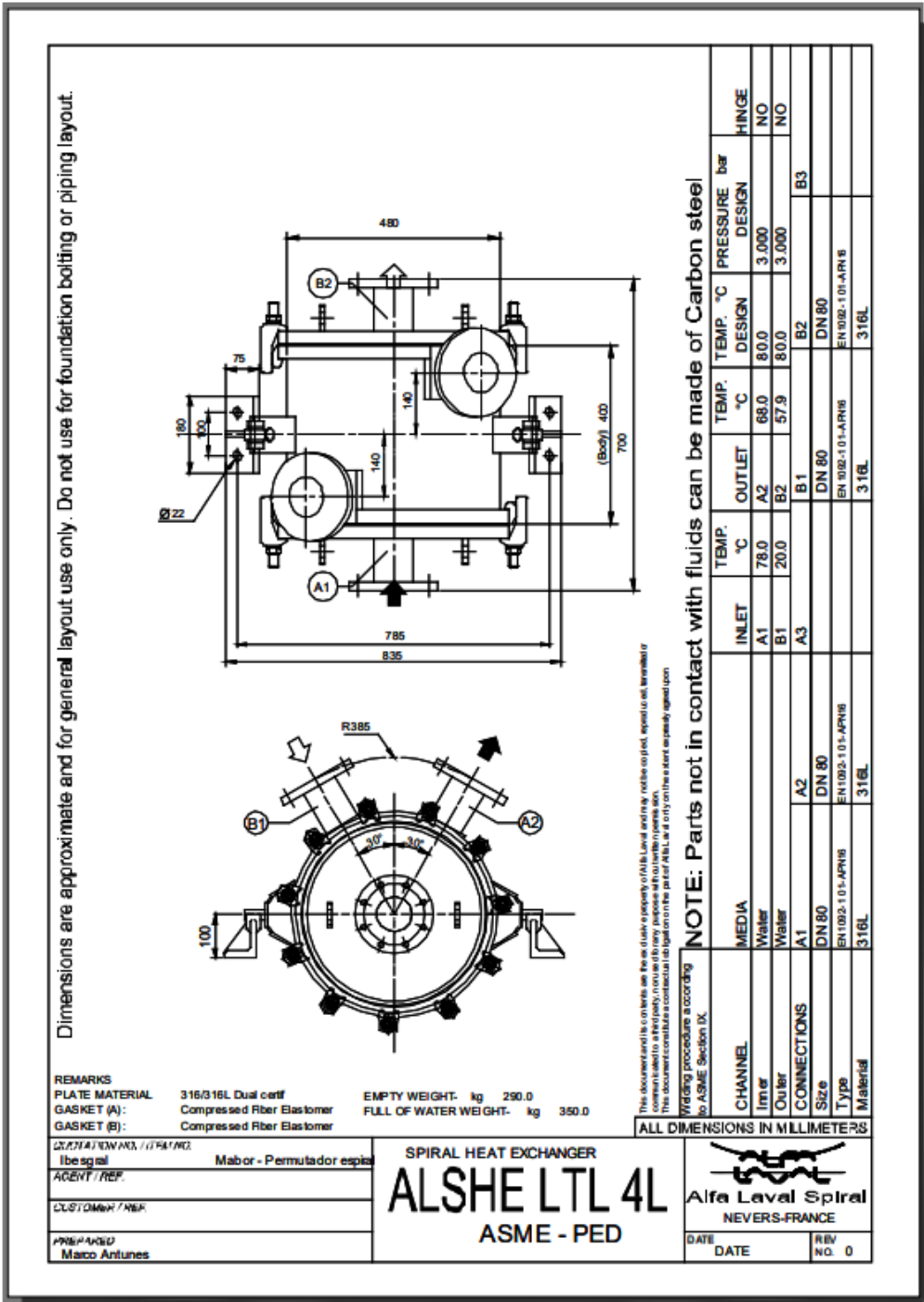


Figura C.8 – Diagrama e dimensões do permutador de calor – Alfa Laval ALSHE LT 4L™

- **Proposta de orçamento do permutador de calor – Alfa Laval ALSHE LT 4L™**

| Item | Quant. | Descrição                                | Preço Unitário | Preço Total |
|------|--------|------------------------------------------|----------------|-------------|
| 001  | 1      | Permutador de calor Espiral ALSHE LTL 4L | 12.510,00 €    | 12.510,00 € |

Figura C.9 - Proposta de orçamento do permutador de calor – Alfa Laval ALSHE LT 4L™

- **Termoventilador Franco SRL AP80**

| Modello<br>Model | Codice<br>Code | Potenza termica*<br>Thermal power* | Portata aria<br>Air flow | Prezzo<br>Price |
|------------------|----------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------|
|                  |                | kW                                 | m³/h                     | Euro            |
| AP80             | 2408081        | 81                                 | 5.000                    | 2.628,00        |

Figura C.10 - Características do termoventilador Franco SRL AP80

- **Difusor de fluxo e Suporte – Auxiliares AP – Franco SRL**

## Accessories

| Modello<br>Model                               | Codice<br>Code | Prezzo<br>Price |
|------------------------------------------------|----------------|-----------------|
|                                                |                | Euro            |
| AP                                             |                |                 |
| Supporto<br>Support                            | 2403300        | 133,00          |
| Deviatori di flusso/Flow diverters<br>AP 15/25 | 2407000        | 123,00          |

Figura C.11 - Características do difusor de fluxo e suporte

- **Análise económica**

O investimento necessário ao projeto contém as parcelas relativas ao orçamento fornecido do permutador de calor Alfa Laval ALSHE LT 4L<sup>TM</sup> (**Ver Figura A.9**) e ao termoventilador Franco SRL AP80 (**Ver Figuras A.10**). Assim, o investimento total para o projeto é de 15 431,00 €.

A poupança anual obtida provém da desativação do termoventilador que é alimentado a vapor saturado na área atual destinada ao descongelamento da borracha. O caudal de vapor que é alimentado a este termoventilador é igual a 0,037 ton/h. O custo atual médio da produção de vapor na CMIP é igual 142,00 €/kWh. A entalpia do vapor saturado a 19 bar é igual a 777,6 kWh/ton (**Ver Anexo A.1**). Com base nesta informação é possível calcular o custo relacionado do consumo de vapor neste termoventilador, através da **Equação C.24**.

*Poupança anual (€)*

$$\begin{aligned}
 &= \dot{m}_{vapor} \left( \frac{ton}{h} \right) \times H_{vapor\ 19\ bar(r)} \left( \frac{kWh}{ton} \right) \\
 &\times 8760 \left( \frac{horas}{ano} \right) \times Custo_{vapor} \left( \frac{€}{kWh} \right) \\
 &= 0,037 \times 777,6 \times 8760 \times 0,148 = 36\ 900,46
 \end{aligned} \tag{C.24}$$

Tendo o valor do investimento necessário e a estimativa da poupança anual, pode-se calcular o valor do PRI, através da **Equação C.25**.

$$PRI\ (anos) = \frac{Investimento\ (€)}{Poupança\ anual(€)} = \frac{15\ 431,00}{36\ 900,46} \cong 0,42 \cong 5\ meses \tag{C.25}$$