



Validação dos dados de Energia adquiridos no MMS e Caracterização dos Consumos Específicos no setor de Misturação

MARIA INÊS PAULO DE SOUSA

Julho de 2023

Validação dos dados de Energia adquiridos no *MMS* e Caracterização dos Consumos Específicos no setor de Misturação

Maria Inês Paulo de Sousa

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

Orientação ISEP: Doutora Anabela Moura e Doutora Paula Neto

Orientação Continental Mabor: Engenheiro Simão Dias

Julho de 2023

Agradecimentos

Com a conclusão desta dissertação não posso deixar de agradecer a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me ajudaram nesta etapa tão importante da minha vida pessoal e profissional.

Agradeço à Continental Mabor, S.A pela oportunidade que me foi concedida de realizar este projeto curricular.

Ao meu orientador da empresa, Eng.º Simão Dias, agradeço pelo acompanhamento, disponibilidade e conhecimento transmitido ao longo de todo o trabalho.

Agradeço às minhas orientadoras do ISEP, Doutora Paula Neto e Doutora Anabela Moura pelo apoio. Em particular, à Doutora Paula Neto que foi incansável durante todo este período, obrigada pela sua total disponibilidade, dedicação e preocupação.

A todos os elementos do DIP Materiais pelo acolhimento e simpatia demonstrada no decorrer do estágio.

A todos os colaboradores da Continental Mabor com quem estabeleci contacto, e que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Gostaria ainda de agradecer a todos os colegas, professores e amigos que de alguma forma me ajudaram ao longo do percurso académico.

Deixo um agradecimento final e muito especial aos meus pais, à minha irmã e ao meu namorado que demonstraram o seu apoio incondicional, paciência e compreensão ao longo deste percurso.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivos a validação de dados de energia adquiridos no *MMS*, seguida da caracterização dos consumos específicos no setor de mistura da empresa Continental Mabor – Indústria de pneus S.A, localizada em Lousado. O trabalho foi desenvolvido no Departamento de Materiais, inserido na Direção de Industrialização do Produto, que além de outras atividades garante a qualidade do processo de mistura, nomeadamente através do sistema de monitorização *MMS – Mixing Management System*. Este *software* regista, entre outros parâmetros, o consumo elétrico dos motores dos misturadores.

Inicialmente, efetuou-se a validação dos dados de energia do *MMS* através da sua comparação com os dados adquiridos no sistema que monitoriza todos os consumos de energia da fábrica, o *MESSDAS – Metering and Energy Saving System with Data Analysis System*. Desta análise, concluiu-se que os valores de energia do *MMS* podem ser validados para os misturadores 6, 7, 10, 11 e 12, e não podem ser validados para o misturador 5, pelo que este foi excluído do restante trabalho.

A segunda parte do trabalho consistiu na determinação dos consumos específicos, utilizando os dados anteriormente validados. Para tal, criou-se uma ferramenta de cálculo e análise no Excel que ficará disponível para utilização por parte das direções do processo e do produto, possibilitando, assim, a monitorização regular dos consumos específicos dos compostos produzidos nos misturadores 6, 7, 10, 11 e 12. Além disso, com base na análise dos resultados do ano de 2023, foram propostas algumas melhorias, sendo as mais relevantes as propostas de alocação dos compostos a misturadores que apresentem maior eficiência energética, sem comprometer a qualidade do produto. No total, estima-se que a concretização destas propostas resulte numa poupança anual de 21 872,48 €. Destaca-se ainda a importância de substituir o processo convencional de produção de compostos pelo *One Step Mixing*.

Em projetos futuros, a inclusão dos restantes misturadores neste estudo e o uso da ferramenta irão alavancar a otimização energética do processo de mistura.

Palavras-chave: Consumos específicos, processo de mistura, otimização energética

Abstract

This dissertation's aim was the validation of energy data acquired in the MMS, followed by the characterization of the specific consumption in the mixing sector of Continental Mabor - Indústria de pneus S.A, located in Lousado. The work was carried out in the Product Industrialization Department, whose main function is to ensure the quality of the mixing process, namely through the MMS - Mixing Management System. This software registers mixing parameters such as the electric consumption of the mixer motors.

Initially, the MMS energy data was validated by comparing it with the data acquired from the system that monitors the plant's energy consumption, the MESSDAS - Metering and Energy Saving System with Data Analysis System. From this analysis, it was concluded that the MMS energy values can be validated for mixers 6, 7, 10, 11 and 12, and cannot be validated for mixer 5, so it was excluded from the rest of the work.

The second part of the work consisted of determining the specific consumptions using the previously validated data. For this purpose, a calculation and analysis tool was created in Excel that will be available for use by the process and product management, thus enabling the regular monitoring of the specific consumption of the compounds produced in mixers 6, 7, 10, 11 and 12. In addition, based on the analysis of the results for the year 2023, some improvements were proposed, the most relevant being the proposals to allocate the compounds to mixers that present higher energy efficiency and, at the same time, comply with the quality requirements. In total, it is estimated that the implementation of these proposals will result in annual savings of 21,872.48 €. Also, the replacement of the conventional process of compound production by One Step Mixing must be implemented.

In future projects, the inclusion of the remaining mixers in this study and the use of the tool will leverage the energy optimization of the mixing process.

Keywords: Specific consumptions, mixing process, energetic optimization

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento da dissertação.....	1
1.2.	Tema e objetivos	1
1.3.	O Grupo Continental.....	1
1.3.1.	A Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.	4
1.4.	Estrutura da dissertação	6
2.	O pneu e o seu processo de fabrico	9
2.1.	O pneu.....	9
2.1.1.	Estrutura do pneu.....	9
2.1.2.	Composição do pneu	11
2.2.	Processo de fabrico do pneu	13
3.	Setor em estudo: Misturação	19
3.1.	Mistura	19
3.2.	Equipamento de mistura: Misturador interno	20
3.3.	Parâmetros da misturação	23
3.4.	Processo de misturação e compostos	25
3.4.1.	<i>Master Batch e Final Mix</i>	26
3.5.	Misturadores Single e Tandem	28
3.6.	Linha de mistura	29

3.7.	Unidades de Controlo de Temperatura (TCU) do misturador	34
4.	Produção e consumo energético do setor de misturação.....	37
4.1.	Produção do setor de misturação	37
4.2.	Consumo elétrico do setor de misturação	39
5.	Validação de dados de Energia no <i>MMS</i>	43
5.1.	Estudo prévio dos <i>softwares</i>	43
5.2.	Recolha, tratamento e comparação dos dados	48
5.3.	Resultados	50
5.3.1.	Análise das correlações obtidas.....	55
5.3.2.	Análise estatística	59
6.	Consumos Energéticos Específicos no setor de Misturação	63
6.1.	Caracterização por misturador	63
6.2.	Caracterização por composto.....	64
6.3.	Alocação da produção de acordo com o CEE.....	65
6.4.	Oportunidades de melhoria	67
6.4.1.	Misturadores da mesma família	67
6.4.2.	Misturadores de famílias diferentes.....	70
6.4.3.	Análise do processo <i>One Step Mixing (OSM)</i>	75
7.	Conclusões	77
8.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	79

Referências bibliográficas	81
Anexos	85
Anexo A – Consumo elétrico do setor de misturação.....	85
Anexo B – Validação dos dados de energia do <i>MMS</i>	88
Anexo B.1. Recolha de dados	88
Anexo B.2. Tratamento de dados	94
Anexo B.3. Método de comparação	96
Anexo B.4. Resultados	99
Anexo B.4.1 Análise das correlações obtidas	102
Anexo B.4.2 Análise estatística	105
Anexo C – Consumos energéticos específicos no setor de misturação	106
Anexo C.1 Caracterização por misturador	106
Anexo C.2 Caracterização por composto	107
Anexo C.3 Alocação por CEE	110
Anexo C.4 Especificações técnicas dos misturadores.....	113
Anexo C.5 Dados dos compostos em análise.....	114
Anexo C.6 Processo <i>OSM</i>	115

Índice de figuras

Figura 1.1 Distribuição do Grupo Continental no mundo em 2021 [2]	2
Figura 1.2 Estrutura do Grupo Continental em 2022 [2]	3
Figura 1.3 Instalações atuais da Continental Mabor em Lousado [7]	5
Figura 1.4 Organigrama da empresa (obtido na rede privada da CMIP)	5
Figura 2.1 Componentes de um pneu [8]	9
Figura 2.2 Distribuição das matérias-primas num pneu radial ligeiro [9]	11
Figura 2.3 Diagrama das etapas do processo de fabrico do pneu na Continental Mabor	13
Figura 3.1 Tipos de mistura: distributiva, dispersiva e laminar [19]	20
Figura 3.2 Misturador concebido por Fernley H. Banbury patenteado em 1916 (imagem à esquerda) e reformulado em 1923 (imagem à direita) [20]	20
Figura 3.3 Rotores do tipo a) tangencial b) intermeshing [22]	21
Figura 3.4 Misturador interno com rotores intermeshing [21]	22
Figura 3.5 Mistura distributiva e dispersiva na câmara de mistura [17]	24
Figura 3.6 Potência requerida e temperatura do composto em função do tempo de mistura no master batch [24]	27
Figura 3.7 Misturador Tandem [25]	28
Figura 3.8 Configuração da extrusora (1) e da calandra (2) na máquina de misturação [26]	30
Figura 3.9 Configuração dos rolos da calandra na máquina de misturação [26] ..	31

Figura 3.10 Configuração dos rolos do moinho de homogeneização na máquina de misturação [27]	31
Figura 3.11 Configuração do tanque de banho antiaderente (1) e batch-off (2) [28]	32
Figura 3.12 Empilhamento de um composto master/final [11].....	32
Figura 3.13 Layout da linha de mistura [29].....	33
Figura 3.14 Esquema da TCU para uma zona do misturador [13].....	35
Figura 4.1 Produção mensal no setor de misturação desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023.....	37
Figura 4.2 Produção por misturador desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023	38
Figura 4.3 Evolução do consumo elétrico do setor de misturação de fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023	39
Figura 4.4 Representatividade da misturação no consumo elétrico total da fábrica em fevereiro de 2023	39
Figura 4.5 Consumo elétrico das linhas de misturação desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023	40
Figura 4.6 Percentagem de consumo elétrico dos equipamentos da linha #10 no mês de fevereiro de 2023	40
Figura 4.7 Percentagem de consumo elétrico dos equipamentos da linha #12 no mês de fevereiro de 2023	41
Figura 5.1 Entradas e saídas do contador de energia elétrica.....	44
Figura 5.2 Esquema representativo da ligação entre o contador e o MESSDAS .	44

Figura 5.3 Visualização gráfica do consumo elétrico total dos motores do misturador 10 no MESSDAS	45
Figura 5.4 Esquema representativo da ligação entre o motor de um misturador e o MMS.....	46
Figura 5.5 Visualização gráfica do consumo elétrico dos motores do misturador 10 no MMS.....	47
Figura 5.6 Consumo elétrico dos motores do misturador 10	51
Figura 5.7 Consumo elétrico dos motores do misturador 11	51
Figura 5.8 Consumo elétrico dos motores do misturador 12	52
Figura 5.9 Consumo elétrico do motor do misturador 5	52
Figura 5.10 Consumo elétrico do motor do misturador 6	53
Figura 5.11 Consumo elétrico do motor do misturador 7	53
Figura 5.12 Dispersão dos pontos para o misturador 10.....	55
Figura 5.13 Regressão linear para o misturador 10.....	56
Figura 5.14 Regressão linear para o misturador 11.....	57
Figura 5.15 Regressão linear para o misturador 12.....	57
Figura 5.16 Regressão linear para o misturador 6.....	58
Figura 5.17 Regressão linear para o misturador 7.....	58
Figura B.1 Batch curves (energia em função do tempo de carga) de 1 de março no misturador 10.....	88
Figura B.2 Pesquisa do misturador 10 na Tag List	89
Figura B.3 Dados acerca dos protocolos de comunicação no MESSDAS	91

Figura B.4 Consumo elétrico dos motores do misturador 10 em março.....	92
Figura B.5 Relatório de produção do dia 1 de março para os misturadores 5, 6, 7, 10, 11 e 12	93
Figura B.6 Consumo elétrico dos motores dos misturadores 5 e 6.....	99
Figura B.7 Consumo elétrico dos motores dos misturadores 7 e 10.....	100
Figura B.8 Consumo elétrico dos motores dos misturadores 11 e 12.....	101
Figura B.9 Retas de ajuste para os misturadores 6 e 7.....	102
Figura B.10 Retas de ajuste para os misturadores 10 e 11.....	103
Figura B.11 Reta de ajuste para o misturador 12	104

Índice de tabelas

Tabela 5.1 Resumo dos resultados: média MESSDAS, média MMS e desvio relativo médio	54
Tabela 5.2 Análise t de Student para o modelo $y=x$	60
Tabela 6.1 CEE médio e distribuição da produção por misturador dos 10 compostos mais produzidos em 2023.....	64
Tabela 6.2 CEE atual, proposta de alocação e resultados de CEE e poupança anual	66
Tabela 6.3 Resultados de poupança anual da alocação ao ML11	71
Tabela 6.4 Resultados de poupança anual da alocação ao ML07	73
Tabela 6.5 Resultados de poupança anual da alocação de compostos de remill aos single.....	75
Tabela 6.6 T18191: CEE médio (kWh/t) e resultados da poupança anual da implementação do OSM	75
Tabela A.1 Consumo elétrico total e do setor de misturação e percentagem que este setor representa na fatura elétrica da Continental Mabor desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023.....	85
Tabela A.2 Consumo elétrico das linhas de misturação desde janeiro de 2022 a fevereiro de 2023.....	86
Tabela A.3 Consumo elétrico dos equipamentos da linha #10 e respetiva representatividade no consumo elétrico total da linha no mês de fevereiro de 2023	87
Tabela A.4 Consumo elétrico dos equipamentos da linha #12 e respetiva representatividade no consumo elétrico total da linha no mês de fevereiro de 2023	87
Tabela B.1 Lista de TAGs dos motores dos misturadores.....	90

Tabela B.2 Excerto da base de dados "Produção e Energia MMS" (primeira carga de março)	95
Tabela B.3 Energia MESSDAS e MMS para o mesmo misturador e período de tempo	98
Tabela C.1 CEE médio e massa total de composto para cada misturador em 2023.....	106
Tabela C.2 CEE médio e distribuição da produção por misturador em 2023.....	107
Tabela C.3 CEE atual, CEE novo, poupança por tonelada, produção anual e poupança anual	111
Tabela C.4 Especificações técnicas dos misturadores	113
Tabela C.5 Distribuição percentual da produção, valor médio de energia e valor médio de massa da carga dos compostos em análise no ano de 2023	114

Lista de abreviaturas e siglas

AG – Automotive Group

CEE – Consumo Energético Específico

CMIP – Continental Mabor, Indústria de Pneus, S.A.

DE – Direção de Engenharia

DEI – Departamento de Energia e Infraestruturas

DIP – Direção de Industrialização Do Produto

M-Bus – *Meter-Bus*

MESSDAS – *Metering and Energy Saving System with Data Analysis System*

MMCS – *Main Mixer Control System*

MMS – *Mixing Management System*

OPC – *Open Platform Communication*

OSM – *One Step Mixing*

PLC – Controlador Lógico Programável

RW – *Re-work*

WO – *Work-off*

1. Introdução

Neste capítulo é realizado o enquadramento da dissertação, bem como a apresentação do tema e dos objetivos da mesma. Segue-se uma breve apresentação do Grupo Continental e da empresa acolhedora do estágio curricular, a Continental Mabor – Indústria de pneus S.A. Por último, é apresentada a estrutura da dissertação.

1.1. Enquadramento da dissertação

A presente dissertação foi realizada no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio, que representa 34 ECTS do 2º ano do Mestrado em Engenharia Química, ramo de Energia e Biorrefinaria.

O estágio curricular teve lugar na Continental Mabor S.A., iniciou-se a 26 de setembro de 2022 e terminou a 30 de junho de 2023.

1.2. Tema e objetivos

O projeto desenvolvido tem como tema a validação dos dados de energia adquiridos num *software*, o *MMS – Mixing Management System* e a caracterização dos consumos específicos no setor de misturação e divide-se em dois grandes objetivos. O primeiro visou a validação dos dados de energia adquiridos no *MMS*, através da comparação com outro *software*, ambos usados pela Continental Mabor em diferentes departamentos. O segundo passou pela caracterização dos consumos específicos no setor da misturação.

1.3. O Grupo Continental

A Continental foi fundada em 1871 na cidade alemã de Hanover, tendo como fabricação principal produtos suaves de borracha, tecidos emborrachados, e pneus maciços para carruagens e bicicletas [1].

Em 1882, o “cavalo galopante” foi atribuído à Continental como imagem de marca [1]. Mais tarde, em 1898, a fábrica iniciou a produção de pneus sem desenho de piso (lisos), para automóveis. Em 1904, a Continental foi pioneira no desenvolvimento e produção de pneus para automóveis com desenho de piso. Em 1905 iniciou a produção de pneus antiderrapantes para neve, e três anos mais tarde, inventou a jante desmontável para automóveis ligeiros [1].

No final de 1920, a empresa fundiu-se com as principais empresas de produção de borracha para formar a "Continental Gummi - Weke AG" [1].

Posteriormente, em 1951, iniciou-se a produção de correias transportadoras com telas metálicas. Em 1955, a Continental AG foi a primeira empresa a desenvolver molas para camiões e autocarros. Foi em 1960 que a produção em série de pneus radiais ligeiros começou. Cerca de 30 anos depois, a empresa introduziu no mercado os primeiros pneus ecológicos para veículos de passageiros [1].

Em 1955, a divisão "Automotive Systems" foi fundada com a finalidade de reforçar a atividade comercial e desenvolvimento de sistemas automotivos para a indústria automóvel. Em 1997, foi apresentada a tecnologia-chave para sistemas ecológicos de arranque do motor e geradores convencionais de híbridos [1].

Atualmente, a Continental já conta com 151 anos desde a sua fundação, é um dos 5 maiores fornecedores mundiais da indústria automóvel e está presente em 58 países, contando com mais de 190 000 colaboradores, como se vê na **Figura 1.1** [2].



Figura 1.1 Distribuição do Grupo Continental no mundo em 2021 [2]

Em 2022, o Grupo Continental foi dividido em quatro setores: *Automotive*, *Tires*, *ContiTech* e *Contract Manufacturing*, tal como apresentado na **Figura 1.2**. O primeiro engloba as tecnologias relativas à segurança passiva, freio, chassis, movimento e sistemas de controlo de movimento. Este setor está dividido em cinco áreas de negócio: *Architecture and Networking*, *Autonomous Mobility*, *Safety and Motion*, *Smart Mobility* e *User Experience*. O setor *Tires* é responsável por fornecer soluções inovadoras ao nível da tecnologia do pneu para todo o tipo de veículos, desde veículos de passageiros e camiões e autocarros, até veículos especiais, motos e bicicletas. Este setor está dividido em cinco áreas de negócio: *Original Equipment*, *Replacement APAC*, *Replacement EMEA*, *Replacement The Americas* e *Specialty Tires*. A *ContiTech* desenvolve e produz peças funcionais, componentes e sistemas para a indústria automóvel e para outras indústrias-chave. Este setor divide-se em seis áreas de negócio: *Advanced Dynamic Solutions*, *Conveying Solutions*, *Industrial Fluid Solutions*, *Mobile Fluid Systems*, *Power Transmission Group* e *Surface Solutions* [2].



Figura 1.2 Estrutura do Grupo Continental em 2022 [2]

Em Portugal, o grupo Continental está representado por 6 empresas: Continental Mabor, Continental – Indústria Têxtil do Ave S.A., Continental Pneus S.A., Continental Advanced Antenna, Continental Lemmerz e Continental Engineering Services [3].

A Continental Mabor localiza-se em Lousado e dedica-se ao fabrico de pneus ligeiros e agrícolas. A Continental – Indústria Têxtil do Ave S.A., situada em Lousado, desenvolve e produz soluções relacionadas com têxteis para diversas indústrias, sendo os principais produtos tecidos e cabos utilizados em pneus, e tecidos de malha que se destinam ao uso em aplicações de couro artificial. A Continental Pneus S.A., sita em Lousado, é responsável pela comercialização para Portugal de pneus do Grupo Continental, para o mercado de equipamento de origem e mercado de substituição de veículos ligeiros, 4x4, veículos comerciais médios e pesados, e veículos

industriais. A Continental Advanced Antenna, localizada em Vila Real, é uma das principais especialistas e fabricantes de antenas para veículos da Europa. A Continental Lemmerz situa-se em Palmela e tem como atividade a montagem de rodas para automóveis. Por último, a Continental Engineering Services inventa, desenvolve e produz soluções tecnológicas para vários setores industriais, incluindo engenharia aeroespacial, agricultura, medicina, transportes marítimos e ferroviários [3].

1.3.1. A Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.

A Continental Mabor, Indústria de Pneus, S.A. (CMIP) nasceu em finais de 1989 resultado da fusão entre a Mabor – Manufatura Nacional da Borracha, S.A. e a Continental AG, de Hannover [3].

Em julho de 1990 deu-se o arranque industrial e começou o projeto de reestruturação, que viria a transformar as antigas instalações fabris numa das mais modernas unidades industriais da Continental. Partindo de uma produção média de 5000 pneus/dia em 1990, foi atingida até ao final de 1996 uma média diária de 21.000 pneus por dia e a exportação de uma grande maioria destes pneus [3].

Em 1993, por aquisição da participação da Mabor, o Grupo Continental passou a deter 100% da unidade de Lousado, sendo esta a maior empresa do Grupo Continental em Portugal [3].

Atualmente, a Continental Mabor conta com duas unidades de produção, pneus ligeiros e pneus agrícolas. A fábrica tem uma capacidade de produção média de 50 a 60 mil pneus por dia, destacando-se como uma das empresas do Grupo Continental com melhores índices de produtividade [3].

Em 2020, a empresa completou 30 anos de existência e até essa data foram produzidos cerca de 350 milhões de pneus [4].

Em 2021, a Continental Mabor faturou 33.765 milhões de euros e teve um lucro operacional de 1.846 milhões de euros [5].

A fábrica de pneus cumpre com todas as normas ambientais em Portugal. Está também certificada de acordo com as normas internacionais de Saúde Ocupacional, Segurança e Ambiente – ISO 14001 & ISO 45001, assim como em conformidade com a diretiva SEVESO [6].

A fábrica de Lousado, apresentada na **Figura 1.3**, estende-se por 650.000 m², emprega atualmente cerca de 2564 colaboradores e opera 24 horas por dia, 350 dias por ano [6].



Figura 1.3 Instalações atuais da Continental Mabor em Lousado [7]

O presente trabalho foi realizado na Direção de Industrialização do Produto (DIP) – materiais. Na **Figura 1.4** está representada a estrutura organizacional da empresa, onde se podem identificar as principais direções da empresa, destacando o DIP.

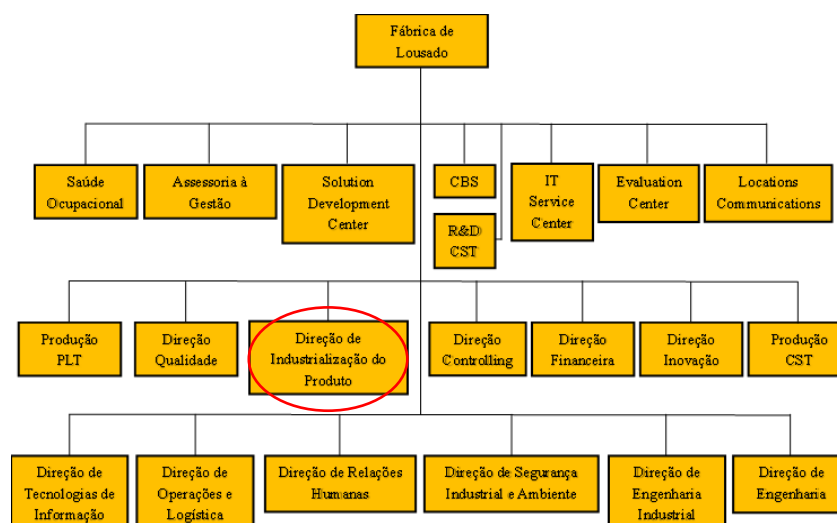


Figura 1.4 Organigrama da empresa (obtido na rede privada da CMIP)

O DIP divide-se em dois subdepartamentos – materiais e construção – e as suas principais responsabilidades passam por:

- Industrializar produtos e materiais;
- Coordenar e preparar a construção de pneus teste;
- Assegurar a realização de consolidações e standardizações;
- Realizar programas de redução de custos;
- Cooperar na resolução de problemas;
- Promover e participar na otimização dos produtos, materiais, processos e sistemas;
- Fazer a ligação entre a Central (*R&D – Research and Development*) e a Continental Mabor;
- Seguimento e monitorização dos pneus em produção.

Uma das principais funções do DIP – materiais é garantir a qualidade do processo de mistura, o que só é possível através da monitorização dos parâmetros do processo pelo sistema *MMS – Mixing Management System*.

Apesar do trabalho ter sido realizado no DIP – materiais, o tema do trabalho está relacionado com o Departamento de Energia e Infraestruturas (DEI), que pertence à Direção de Engenharia.

A principal função do DEI é assegurar a disponibilidade dos recursos energéticos necessários, otimizando a sua utilização. À semelhança do DIP, recorrem a *softwares*, nomeadamente ao *MESSDAS – Metering and Energy Saving System with Data Analysis System* – para monitorizar os parâmetros de energia em todos os setores da fábrica.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos.

No capítulo 1 é abordado o enquadramento da dissertação, bem como o tema e objetivos da mesma, sendo ainda feita uma breve apresentação da empresa.

No capítulo 2 é realizada a descrição sucinta da estrutura e composição do pneu e do processo produtivo da Continental Mabor S.A.

No capítulo 3 é feita uma descrição detalhada do setor de misturação, setor em estudo na presente dissertação.

No capítulo 4 é realizado um levantamento da produção e do consumo energético no setor de misturação.

No capítulo 5 é feita uma descrição sucinta dos *softwares* referidos anteriormente, bem como das várias etapas que culminaram na criação de um método de comparação dos dados de energia adquiridos pelos dois sistemas.

No capítulo 6 é feita a determinação dos consumos específicos por misturador e por composto a partir dos dados de energia do *MMS* que foram validados no capítulo anterior.

Por fim, nos capítulos 7 e 8 apresentam-se, respetivamente, as principais conclusões da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2. O pneu e o seu processo de fabrico

Neste capítulo são abordados os conteúdos genéricos alusivos ao tema da dissertação, como é o caso do pneu e o seu processo de fabrico na Continental Mabor S.A.

2.1. O pneu

O pneu é um componente essencial nos meios de transporte terrestres. Este desempenha quatro funções básicas: mantém o volume de ar comprimido que suporta a carga do veículo, transmite forças longitudinais de tração, travagem e aceleração do veículo à superfície da estrada, proporciona estabilidade direcional quando se muda ou se mantém a direção em estrada e complementa a suspensão do veículo [8].

2.1.1. Estrutura do pneu

O pneu aparenta ter uma estrutura simples, porém da sua composição fazem parte várias camadas, cada uma com as suas funções e características. Na **Figura 2.1** podem ser observadas as diferentes camadas que compõem um pneu.

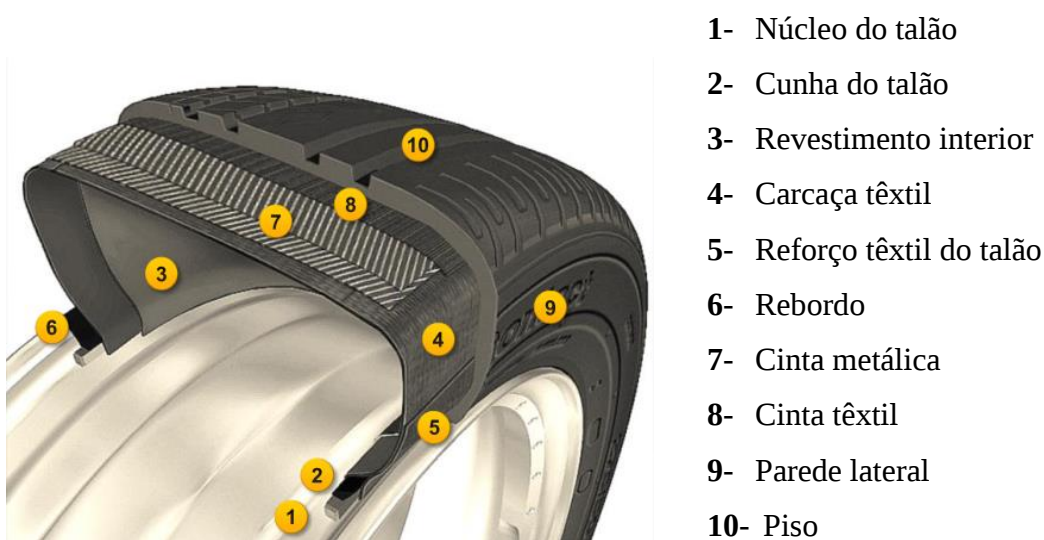


Figura 2.1 Componentes de um pneu [8]

De seguida é feita uma descrição sucinta de todos os componentes do pneu, bem como das suas funcionalidades.

O piso (10) é a camada externa do pneu que se divide em três partes, a capa, a base e o ombro. A capa é a camada externa do piso que garante aderência à estrada, resistência ao desgaste e à estabilidade direcional. A base é a camada interna do piso que proporciona adesão às cintas têxtil e metálica. Por último, o ombro corresponde à transição entre o piso e a parede lateral do pneu. O piso é constituído por borracha natural e/ou sintética e o padrão marcado na sua superfície influencia a aquaplanagem, o ruído e a manobrabilidade [8].

A cinta têxtil (8) é constituída por cordões de nylon ou uma combinação de nylon e aramida, incorporados numa tira de borracha. Esta cinta serve de reforço ao piso e permite melhorar a manobrabilidade e a estabilidade dimensional a velocidades elevadas [8].

Quanto à cinta metálica (7), esta é constituída por cordões de aço de elevada resistência entrelaçados entre si, numa matriz de borracha. Esta cinta é responsável por conferir rigidez para estabilizar a forma do pneu e assegurar estabilidade direcional, e por conferir flexibilidade vertical para se deformar na presença de um obstáculo [8].

Após estas camadas, encontram-se a carcaça têxtil (4) e o revestimento interior (3). A carcaça têxtil é constituída por cordões multifilamento de rayon ou poliéster impregnados numa matriz de borracha. Este componente suporta a carga e velocidade com o auxílio do ar sob pressão e transmite as forças que atuam no pneu ao conjunto roda. O revestimento interior é feito de borracha butílica, e retém o ar no interior do pneu, assemelhando-se a uma câmara de ar [8].

A parte lateral do pneu compreende a parede lateral (9) e o talão. A parede lateral do pneu é composta por borracha natural e serve para proteger a carcaça contra danos e efeitos das condições climáticas. Relativamente ao talão, este é dividido em três partes, o núcleo do talão (1), a cunha do talão (2) e o reforço do talão (5). O núcleo do talão é formado por fios de aço cobertos de borracha, que asseguram que o talão encaixa com firmeza na jante e transmitem o binário do motor. A cunha do talão é constituída por

borracha sintética e garante a precisão da direção, a estabilidade direcional e o conforto do rolamento. Por último, o reforço do talão consiste numa cinta de cordões de rayon, nylon ou poliéster incorporados numa matriz de borracha. Este componente proporciona uma maior estabilidade direcional, precisão da direção e capacidade de condução a velocidades elevadas [8].

Por fim, o rebordo (6) é composto por borracha sintética e tem como funções garantir a estanquicidade do ar e o assento do pneu na jante [8].

2.1.2. Composição do pneu

O pneu resulta de uma mistura complexa de diversas matérias-primas que podem ser agrupadas em sete categorias: borrachas, enchedores, materiais de reforço, auxiliares de processamento, agentes de vulcanização, agentes de proteção e outros materiais diversos. Estas matérias-primas são misturadas em diferentes composições de acordo com receitas adequadas a cada tipo de pneu [9].

A **Figura 2.2** representa a composição média de cada matéria-prima utilizada para produzir um pneu de um veículo ligeiro de passageiros.

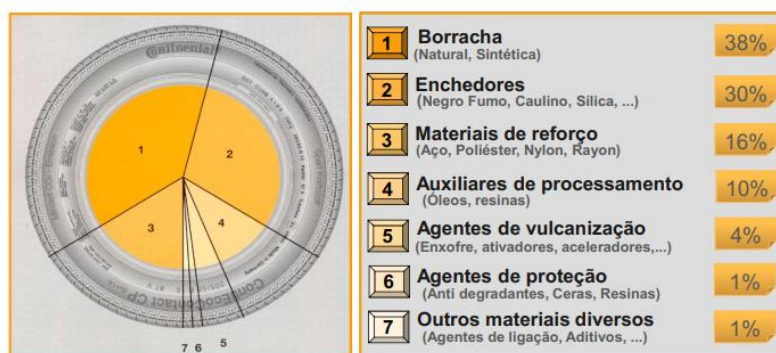


Figura 2.2 Distribuição das matérias-primas num pneu radial ligeiro [9]

As **borrachas** são a base para o composto. Estes polímeros de elevado peso molecular podem ser naturais ou sintéticos, têm a capacidade de vulcanizar e são modeláveis antes da vulcanização quando sujeitos ao calor e à pressão. Os compostos de borracha proporcionam propriedades viscoelásticas aos componentes do pneu e conferem estanquicidade ao pneu [9].

Os **materiais de reforço** podem ser metálicos ou têxteis. A indústria do aço fornece arame de aço para o fabrico de fios e cordas enquanto a indústria têxtil fornece fibras de nylon, rayon, poliéster e aramida para o fabrico de cordas [9].

Os **enchedores**, também conhecidos como cargas, podem ser de dois tipos: de reforço ou de não reforço. Os enchedores de reforço aumentam a performance do pneu após a sua produção, melhorando propriedades mecânicas como a resistência à fratura, à fadiga, ao desgaste, à abrasão e ao rasgo. O negro de fumo e a sílica são os enchedores de reforço mais usados. Já os enchedores de não reforço, como o caulino e o carbonato de cálcio, permitem reduzir o custo de construção do pneu, pois substituem materiais mais caros. Além disso, a adição destes materiais melhora propriedades do pneu como a estanquicidade ao ar e o aspeto visual [9].

Os **auxiliares de processamento** compreendem diferentes tipos de matérias-primas como os óleos amaciadores, os ácidos gordos, os promotores de adesividade e os plastificantes. A adição destas matérias-primas tem como objetivo melhorar o processo produtivo do pneu. Os óleos promovem a dispersão de cargas durante a mistura e evitam a acumulação excessiva de calor na mistura. Os ácidos gordos diminuem a aderência da borracha quente às peças metálicas e reduzem a viscosidade do composto. Os promotores de adesividade controlam a aderência da borracha processada. Os plastificantes provocam a quebra química das cadeias de polímero de modo a reduzir a sua viscosidade e facilitam a libertação do pneu do molde [9].

Os **agentes de vulcanização** são substâncias que intervêm na reação de vulcanização. O enxofre reage com as ligações duplas do polímero para formar ligações cruzadas entre as cadeias, sendo por isso o promotor desta reação. Se necessário podem ser adicionados aceleradores ou retardadores de modo a aumentar ou reduzir a velocidade da reação de vulcanização, respetivamente. Pode ainda recorrer-se a outro tipo de aditivos, os ativadores de vulcanização, que são usados para aumentar a eficiência da formação de ligações cruzadas durante a reação [9].

Os **agentes de proteção** fornecem proteção química ou criam uma barreira física contra o ataque químico da borracha pelo meio ambiente. Esta categoria abrange os

antioxidantes, que protegem contra o envelhecimento causado pela exposição ao ar, os antiozonantes, que protegem contra o ataque do ozono e as ceras, que conferem proteção estática [9].

Existem ainda outras matérias-primas que não fazem parte dos grupos anteriores e cujo papel é promover a adesão da borracha ao material metálico ou têxtil, como é o caso das resinas reforçantes [9].

2.2. Processo de fabrico do pneu

Na Continental Mabor, o processo de fabrico do pneu desde as matérias-primas até ao produto acabado compreende as cinco grandes etapas contempladas na **Figura 2.3**: misturação, preparação, construção, vulcanização e inspeção final [10].

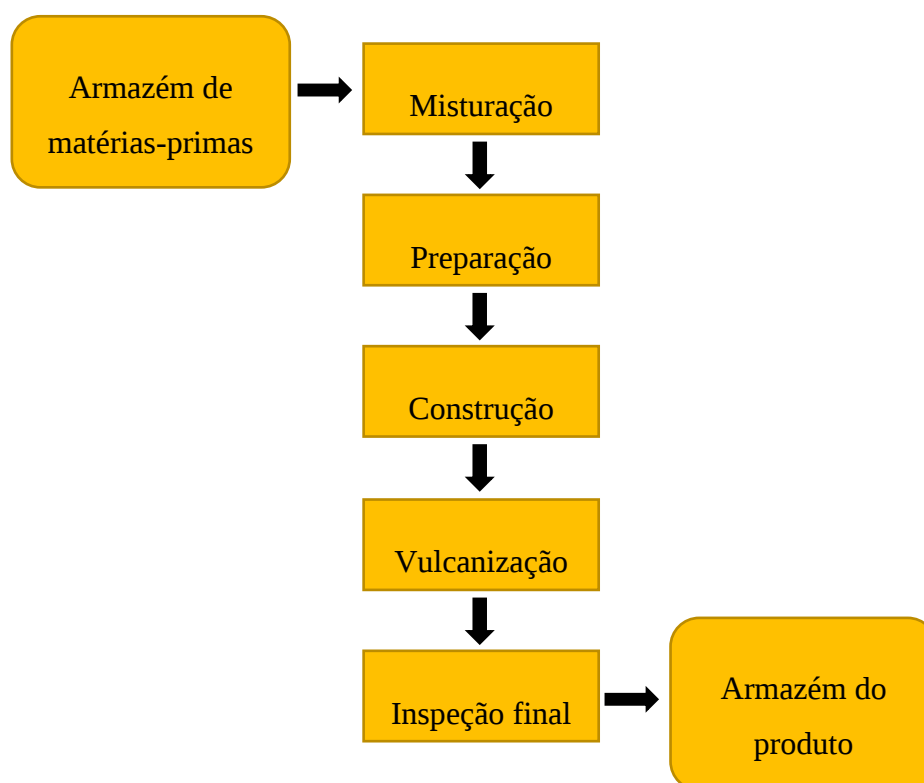


Figura 2.3 Diagrama das etapas do processo de fabrico do pneu na Continental Mabor

O processo de fabrico começa com a etapa de misturação, na qual são produzidos os vários compostos de borracha que depois seguem para a preparação. Na fase de preparação usam-se os compostos de borracha e os materiais de reforço para produzir os componentes necessários à montagem do pneu. Na fase de construção, os vários produtos semiacabados agrupam-se na máquina de construção de pneus e procede-se à montagem do chamado "pneu verde". Posteriormente, o pneu é enviado para a vulcanização, a reação química de reticulação dos polímeros que permite transformar a borracha em bruto numa borracha elástica. É nesta etapa que o pneu adquire a sua forma final e o relevo pretendido. Por fim, o pneu está pronto e têm de ser sujeito a uma inspeção que assegure o cumprimento de todos os requisitos de qualidade [10]. Em seguida, encontra-se uma descrição sucinta de cada uma destas etapas.

- Armazém de matérias-primas

Neste local efetua-se a receção e armazenagem de todas as matérias-primas utilizadas pela Continental Mabor. Todas as matérias-primas rececionadas são submetidas a um controlo de qualidade, com vista a garantir o cumprimento de todas as especificações de qualidade necessárias ao bom funcionamento do processo de fabrico [11].

- Misturação

A primeira fase do processo diz respeito à misturação. Começa-se pela pesagem das matérias-primas de acordo com a receita, que é específica para cada tipo de pneu [12]. De seguida, os materiais pesados – polímeros de borracha natural e sintética, enchedores, agentes de proteção, agentes de vulcanização e auxiliares de processamento – são encaminhados para o misturador e transformados num composto de borracha homogénea [13]. Dado que este processo é alvo de estudo da presente dissertação, no **Capítulo 3** será abordado de uma forma mais detalhada. No fim do processo de misturação, o material é sujeito a controlo e, posteriormente, é transportado em lotes e armazenado na zona de preparação até ser consumido [14].

▪ Preparação

Nesta etapa, as mesas de borracha provenientes da misturação e os materiais de reforço são processados em extrusoras, calandras e máquinas de corte para o fabrico dos componentes necessários à construção do pneu [13].

Na extrusão, os compostos provenientes da misturação são introduzidos numa extrusora, que consiste num parafuso que pressiona os compostos através de uma abertura, originando um perfil. Nesta etapa são produzidos perfis de borracha, paredes laterais e pisos [11].

A calandragem divide-se em dois tipos, conforme o material a tratar. A calandragem de tecido consiste na impregnação ou revestimento de um tecido têxtil ou metálico com borracha. Na calandragem de borracha, um composto de borracha é calandrado com o objetivo de obter uma camada de borracha larga e fina que constitui o revestimento interior do pneu [11].

Após calandragem de tecido, é realizado o corte do tecido têxtil, obtendo-se assim a carcaça têxtil, a cinta têxtil e o reforço do talão, e o corte do tecido metálico, do qual resulta a cinta metálica [11].

Estes componentes são posteriormente colocados em diferentes carros e conduzidos até à zona de construção [12].

▪ Construção

Depois de obtidos todos os componentes necessários à montagem do pneu, estes dão entrada na fase da construção. O local de construção organiza-se em vários módulos, sendo que cada módulo é composto por duas máquinas de montagem, denominadas de KM (*Karkasse Machine*) e PU (*Production Unit*). Primeiramente, a KM constrói a carcaça do pneu através da junção da camada estanque, da tela têxtil, do talão, da parede lateral e de seguida, a PU une à carcaça a cinta metálica, a cinta têxtil e o piso. Os pneus montados, intitulados “pneus em verde” ou “pneus em cru”, seguem para a vulcanização [13].

▪ Vulcanização

Previamente à vulcanização, os “pneus em verde” seguem através de transportadores automáticos para uma cabine de pintura, para serem pintados e pulverizados no seu interior com um lubrificante, que permite reduzir a aderência da borracha ao molde da prensa de vulcanização, facilitando assim a libertação do pneu vulcanizado [15].

Posteriormente, os pneus são transportados em carros até à zona onde se situam as prensas de vulcanização. Nesta etapa, o “pneu em verde” é inserido na prensa, onde é comprimido contra o molde durante um determinado período sob condições controladas de temperatura e pressão. O molde da prensa apresenta gravações, conferindo, deste modo, ao pneu as marcações laterais e o padrão do piso pretendidos [14].

A vulcanização é uma reação química de reticulação que altera a estrutura química da borracha sob a ação do calor e pressão. Mais concretamente, nesta reação, os átomos de enxofre convertem um polímero constituído por longas cadeias de moléculas independentes numa rede tridimensional, unindo quimicamente estas moléculas em vários pontos ao longo da cadeia [15]. Por consequência, a borracha depois de vulcanizada passa a ter um comportamento elástico em vez de plástico, não sendo possível a partir deste momento reintroduzir o pneu no processo de fabrico, caso este não tenha as especificações pretendidas [11].

Por outras palavras, a vulcanização é o processo de “cozedura” do “pneu em verde”, no qual este adquire o seu aspeto final e as propriedades mecânicas desejadas [15].

Findo o processo de vulcanização, os pneus são enviados através de um transportador automático para a zona de inspeção final [12].

▪ Inspeção final

Os pneus vulcanizados são sujeitos a um processo de inspeção, inicialmente visual e posteriormente automático. Neste último, os pneus são submetidos a testes de geometria e de uniformidade. Enquanto nos testes de geometria são verificados parâmetros como o

peso, diâmetros e excentricidade, nos testes de uniformidade é analisada a resposta do pneu perante a aplicação de forças radiais e laterais, por exemplo [12].

Após esta avaliação, e caso o pneu cumpra com todos os critérios de qualidade, este está pronto a ser expedido, sendo encaminhado para o armazém de produto acabado [13].

3. Setor em estudo: Misturação

Apresenta-se aqui uma breve noção sobre a mistura de polímeros e o funcionamento do equipamento mais utilizado a nível industrial, o misturador interno. Segue-se a descrição dos parâmetros de misturação e das várias etapas deste processo. Posteriormente, são apresentadas duas tecnologias de misturação, bem como a linha completa do setor de misturação da fábrica.

3.1. Mistura

Quando se juntam diferentes substâncias e não ocorre qualquer reação química entre elas, forma-se aquilo que se designa por mistura. Assim, uma mistura resulta da combinação mecânica de dois ou mais componentes de modo que cada componente mantém as suas propriedades químicas. Contudo, as propriedades físicas de uma mistura, tais como o seu ponto de fusão e ponto de ebulição, podem diferir dos seus componentes puros [16].

Num processo típico de misturação de polímeros podem distinguir-se três tipos de mistura:

- **Mistura distributiva:** Permite mudar a posição dos componentes na matriz de modo a distribuí-los uniformemente, sem alterar o seu tamanho [17].
- **Mistura dispersiva:** Permite reduzir o tamanho dos componentes de uma matriz através da quebra de aglomerados por aplicação de forças de cisalhamento. Também pode ocorrer a alteração da posição dos componentes na matriz [17].
- **Mistura laminar:** Permite mudar a forma dos componentes sem os quebrar por aplicação de forças de cisalhamento. À medida que os componentes se deformam, a sua espessura diminui e a sua área superficial aumenta, sendo o volume constante [18].

Na **Figura 3.1** pode observar-se o efeito distributivo, dispersivo e laminar numa mistura.

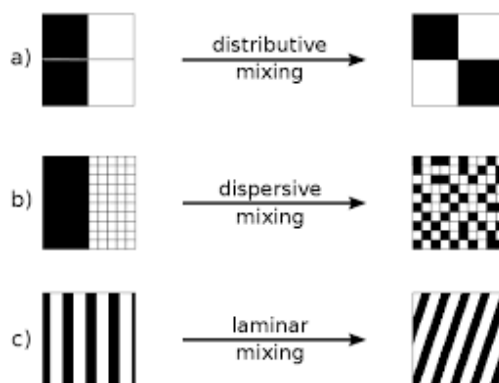


Figura 3.1 Tipos de mistura: distributiva, dispersiva e laminar [19]

3.2. Equipamento de mistura: Misturador interno

O equipamento mais conhecido e utilizado para produzir compostos de borracha em todo o mundo é o misturador interno, designado vulgarmente por *Banbury* devido ao nome do seu inventor, *Fernley Banbury* [20].

O misturador concebido em 1923 por *Banbury*, apresentado na **Figura 3.2**, deu o mote aos aperfeiçoamentos subsequentes [20].

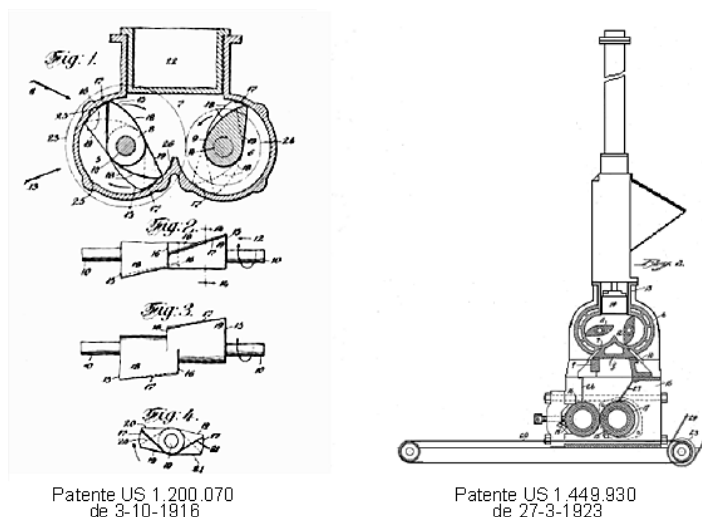


Figura 3.2 Misturador concebido por Fernley H. Banbury patenteado em 1916 (imagem à esquerda) e reformulado em 1923 (imagem à direita) [20]

Os misturadores internos são máquinas em que a mistura é processada dentro de uma câmara, no interior da qual existem dois rotores que rodam em sentidos opostos [21].

Os rotores possuem pás de configuração helicoidal que promovem a incorporação e a mistura dos vários componentes na borracha. Assim, a eficiência da mistura depende, em grande parte, do tipo de rotor utilizado [21]. Há dois tipos de rotores em misturadores internos:

- Rotores tangenciais – **Figura 3.3 a)** – durante a sua rotação as pás dos rotores ficam quase tangentes ao corpo do rotor vizinho, pelo que a ação de mistura ocorre entre o rotor e as paredes internas da câmara [21].
- Rotores *Intermeshing* – **Figura 3.3 b)** – durante a sua rotação as pás dos rotores penetram no campo de ação do rotor vizinho de forma sincronizada, pelo que a ação de mistura ocorre entre ambos os rotores e entre o rotor e as paredes internas da câmara [21].

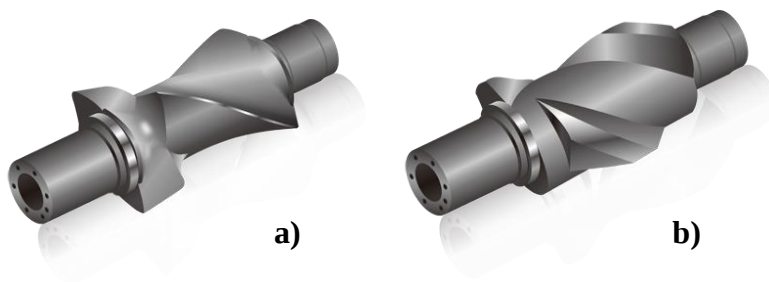


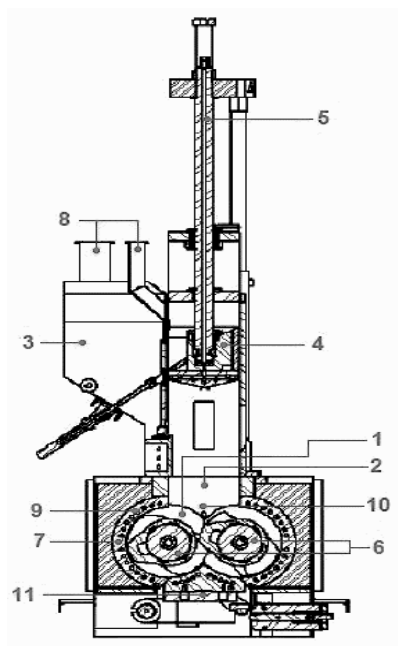
Figura 3.3 Rotores do tipo a) tangencial b) intermeshing [22]

Os rotores tangenciais podem rodar a velocidades diferentes (rotores assíncronos). Em alguns tipos de misturadores com rotores tangenciais assíncronos, as velocidades dos rotores podem ser variáveis. Os rotores tangenciais podem também possuir velocidades iguais (rotores síncronos). Neste caso, a disposição relativa dos rotores (orientação) pode ser desfasada. Já os rotores *intermeshing* são síncronos, isto é, giram à mesma velocidade, podendo esta ser variável [21].

Os veios de suporte dos rotores são perfurados e os rotores são ocos para que se possa fazer circular no seu interior um fluido de arrefecimento (em geral água), de modo a controlar a temperatura na câmara de mistura [21].

Cada tipo de rotor tem as suas vantagens e desvantagens. Nos rotores tangenciais a admissão de carga – *intake* – é mais rápida, uma vez que o espaço entre os rotores é maior, o que permite reduzir o tempo do processo de misturação. No entanto, a ação de mistura não é tão eficiente pois ocorre apenas entre o rotor e as paredes internas da câmara. O arrefecimento do composto de borracha também não é tão eficiente porque a área de contacto entre o rotor e o composto é menor. Nos rotores *intermeshing* o *intake* é mais lento pelo facto do espaço entre os rotores ser mais reduzido e, por isso, o tempo do processo de misturação aumenta. Por consequência, o consumo energético aumenta, em comparação com os rotores tangenciais, para a produção de um mesmo composto. Por outro lado, a ação de mistura e o arrefecimento são mais eficientes visto que a área de contacto entre o rotor e o composto é maior. Em geral, este tipo de rotor é mais utilizado industrialmente pois permite a obtenção de um composto de borracha de maior qualidade [23].

Os rotores são o principal constituinte de um misturador interno, mas existem ainda muitas outras peças. A **Figura 3.4** mostra um corte transversal de um misturador interno com rotores *intermeshing*, no qual aparece a numeração e a respetiva legenda de todas as peças que constituem este equipamento.



- 1- Câmara de mistura
- 2- Abertura na parte superior da câmara
- 3- Zona de carga
- 4- Pistão
- 5- Martelo pneumático
- 6- Rotores
- 7- Paredes da câmara de mistura
- 8- Sistema de exaustão
- 9- Sistema de arrefecimento das paredes da câmara
- 10- Termopar
- 11- Zona de descarga

Figura 3.4 Misturador interno com rotores *intermeshing* [21]

O misturador interno opera em *batches*. Em cada *batch* a carga é admitida pela zona de carga (3). Feita a admissão, o pistão (4) desce, por ação do martelo pneumático (5), empurrando a carga para o interior da câmara de mistura (1). O pistão continua a descer, pressionando a carga contra os rotores (6) e as paredes da câmara de mistura (7), o que permite aumentar as tensões de corte e, por consequência, a eficiência da operação. No final do processo, o composto de borracha sai pela zona de descarga (11), por ação da gravidade. A temperatura da mistura é medida pelo termopar (10) e controlada através dos sistemas de arrefecimento (por circulação de água) das paredes da câmara e dos rotores. Na parte superior da zona de carga existe um sistema de exaustão (8) que capta as poeiras e os gases provenientes da câmara de mistura [21].

Para evitar a fuga de componentes entre os eixos dos rotores e a câmara de mistura existem dois sistemas: um sistema de vedantes e um sistema de lubrificação [21].

O pistão sobe no início de cada *batch* e em operações de limpeza, em que se varrem para a câmara de mistura os resíduos depositados na parte superior do pistão e agarrados às paredes do misturador na zona de carga [21].

3.3. Parâmetros da misturação

A produção de um composto é um processo *batch* muito complexo, sendo necessário controlar com rigor vários parâmetros de acordo com a especificação da mistura. Para tal, é utilizado o programa *Mixing Management System*, *MMS*, que monitoriza, entre outros, os seguintes parâmetros:

- Temperatura da mistura: medida pelo termopar que se encontra no interior da câmara de mistura;
- Velocidade de rotação dos rotores: número de rotações por minuto;
- Pressão exercida pelo pistão;
- Torque dos rotores: força x distância requerida para a rotação dos rotores;
- Tempo de mistura: tempo medido entre a carga e a descarga do material;

- Energia de mistura: integral da potência do motor ao longo do tempo de mistura;
- Fator de enchimento: percentagem de volume do misturador ocupada por material [24].

A otimização destes parâmetros permite a qualidade do processo de mistura. Por exemplo, se o fator de enchimento for baixo, o material permanece na parte inferior da câmara de mistura – zona 1. Nesta zona predomina a mistura distributiva. Geralmente ocorre no início do processo quando a câmara de mistura ainda não está muito cheia. À medida que o fator de enchimento aumenta, o material começa a ocupar outras zonas da câmara (zonas 2 e 3). Nestas zonas são exercidas elevadas tensões de corte sobre o material, pelo que a mistura se torna predominantemente dispersiva. O aumento das tensões implica o aumento do torque dos rotores e, por consequência, da energia e da temperatura da mistura. Se o fator de enchimento continuar a aumentar surgem as “zonas mortas”, nas quais a mistura dispersiva não é efetiva. Por consequência, pode afirmar-se que existe um fator de enchimento ótimo para cada ciclo de mistura. A **Figura 3.5** mostra os tipos de mistura associados a cada zona da câmara de mistura [17].

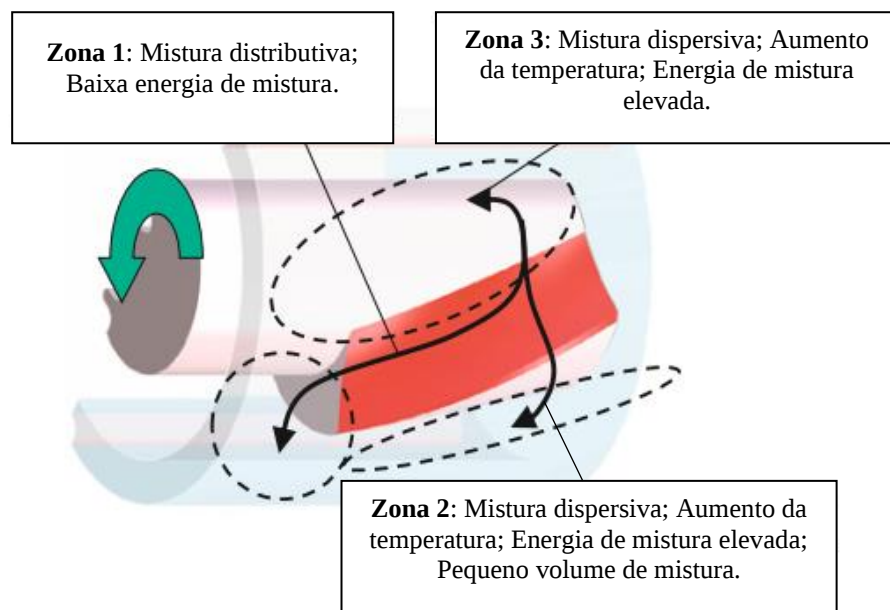


Figura 3.5 Mistura distributiva e dispersiva na câmara de mistura [17]

3.4. Processo de misturação e compostos

A produção de um determinado composto resulta de uma sequência de várias etapas que podem ser:

- *Mastication*: Tem como finalidade a redução da viscosidade do polímero [24];
- *Remill*: Tem como finalidade a redução da viscosidade do composto [24];
- *Master Batch*: Dispersão dos enchedores e auxiliares de processamento (ex.: óleos amaciadores) nos polímeros, envolvendo altas temperaturas e tensões de corte [24];
- *Final Mix*: Distribuição dos agentes de vulcanização, envolvendo baixas temperaturas e tensões de corte [24];
- *Straining*: Filtragem dos materiais estranhos no composto com o objetivo de melhorar as suas características. É uma etapa opcional que depende das características dos compostos obtidos e da sua finalidade. Também é realizada quando se pretende aproveitar compostos que foram descartados ou danificados nas etapas seguintes do processo [11].

Os compostos são designados por diferentes prefixos consoante a etapa ou etapas envolvidas na sua produção. Estes são apenas alguns dos prefixos usados:

- MA – *Mastication*;
- M1 – *Master* (1 etapa);
- M2 – *Master* (2 etapas);
- R1 – *Remill* (1 etapa);
- M3B – *Master* alimentado no misturador superior e inferior;
- F1 – *Final mix*;
 - FMF (*Final mix finished*) = F1 + *Re-work (RW)/Work-off (WO)* – O F1 é misturado com reprocessado (composto rejeitado que é devolvido à misturação), produzindo FMF, que pode avançar para a preparação;

- FMO = M1 (no misturador superior) + FMF (no misturador inferior com ou sem RW/WO) – O composto final é produzido diretamente das matérias-primas por um processo chamado *One Step Mixing (OSM)*. Pode avançar para a preparação.

O WO é material constituído por mais do que um composto, proveniente da preparação e/ou construção, enquanto o RW é material constituído pelo próprio composto, proveniente da preparação.

3.4.1. *Master Batch e Final Mix*

A misturação *master* e a misturação final são as etapas fundamentais para a produção dos compostos de borracha. Na misturação *master* pretende-se adicionar e misturar os polímeros de borracha natural e sintética, os enchedores e os auxiliares de processamento, de modo a obter um composto intermédio. Posteriormente, este é enviado para a misturação final para que sejam adicionadas e misturadas as matérias-primas em falta, como é o caso dos ativadores, aceleradores e agentes de vulcanização, obtendo-se assim o composto final [11].

A adição das matérias-primas tem de ser realizada em etapas de misturação diferentes para permitir condições operatórias diferentes. No caso da misturação *master*, a temperatura de operação tem de estar compreendida entre 145°C e 170°C, enquanto na misturação final esta temperatura não deve exceder 115°C, dado que para temperaturas superiores o composto poderá sofrer vulcanização, o que impede a sua utilização nas etapas seguintes [11].

Ao longo da misturação *master* podem identificar-se 5 fases distintas, tal como se observa na **Figura 3.6**, que representa a potência requerida em kW (linha azul) e a temperatura do composto (linha vermelha) em função do tempo de mistura num processo típico de *master batch* [24].

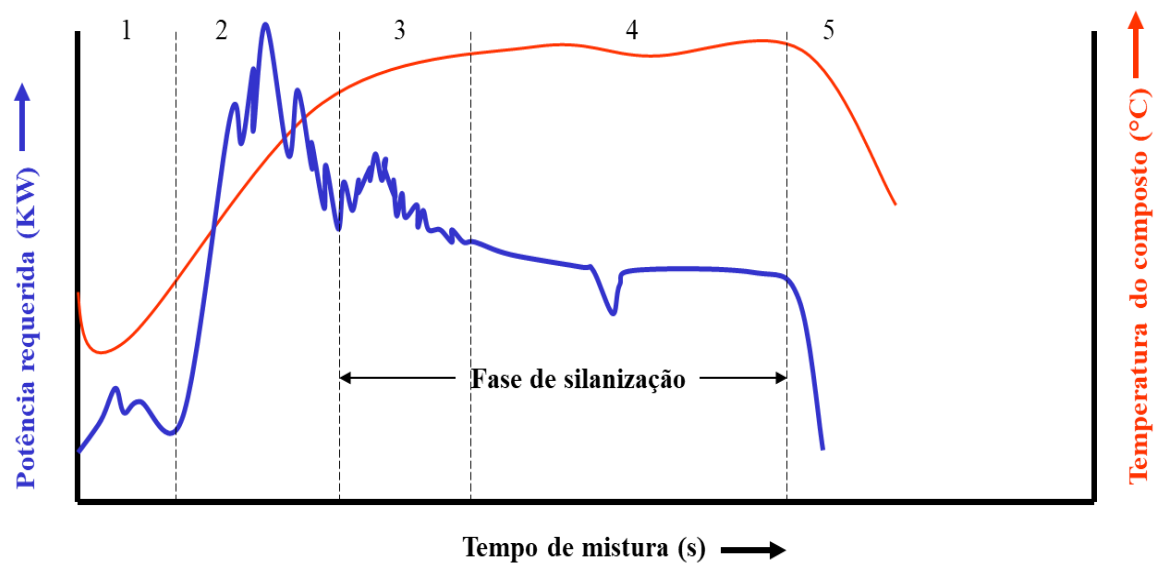


Figura 3.6 Potência requerida e temperatura do composto em função do tempo de mistura no master batch [24]

- **Fase 1:** Inicia-se o processo de misturação com a carga dos polímeros de borracha e enchedores no misturador;
- **Fase 2:** Dá-se a incorporação dos enchedores nos polímeros. Verifica-se um aumento súbito da potência requerida devido à descida do martelo pneumático que comprime a carga contra os rotores. A compressão provoca um aumento das tensões de corte exercidas sobre o composto, aumentando assim a sua temperatura.
- **Fase 3:** Inicia-se a carga dos óleos. A adição de matéria-prima líquida reduz a viscosidade da mistura, promovendo deste modo a dispersão dos enchedores nos polímeros. Corresponde também ao início da fase de silanização.
- **Fase 4:** Termina a dispersão do composto, como se pode verificar pela diminuição e estabilização da potência. Esta etapa tem como objetivo manter a temperatura do composto constante para controlar a reação química de silanização. Para tal, a velocidade de rotação dos rotores é ajustada de modo a evitar oscilações na temperatura do composto.
- **Fase 5:** Conclui-se o processo de misturação com a descarga do composto [24].

Como já foi referido no **subcapítulo 2.1.2**, a sílica é um dos enchedores de reforço mais utilizados na produção dos pneus. Contudo, a mistura da sílica, que contém grupos

silanol que lhe conferem alguma polaridade, com a matriz não polar de borracha é difícil. Para melhorar a interação sílica-borracha é utilizado um agente ativador da ligação, o silano, que tem duas funções: diminuir a polaridade da superfície da sílica, melhorando a mistura com a borracha – **silanização** – e assegurar a reação de vulcanização com o polímero [24].

3.5. Misturadores Single e Tandem

A maioria dos compostos passam por um processo de *master batch* seguido de *final mix*, podendo estes ser realizados em misturadores do tipo *Single* ou *Tandem*. O primeiro possui apenas uma câmara de mistura, pelo que realiza um processo de cada vez, enquanto o segundo possui duas câmaras tal como se pode ver na **Figura 3.7**. Por esse motivo, pode realizar estes dois processos em contínuo [17].



Figura 3.7 Misturador Tandem [25]

A câmara superior apresenta um volume menor e está munida de um martelo. O *input* de energia é elevado, o que promove uma boa dispersão dos componentes na mistura. Quando o composto atinge uma determinada temperatura é descarregado na câmara inferior e logo a seguir inicia-se o próximo ciclo de mistura. A câmara inferior apresenta um volume maior e não tem martelo. O volume da mistura mantém-se igual, pelo que o volume vazio do misturador é maior, o que promove uma boa distribuição dos componentes na mistura. Ademais, a câmara inferior proporciona uma maior área de arrefecimento, o que permite um controlo mais eficiente da temperatura do composto [17].

Assim, a tecnologia dos misturadores *Tandem* acarreta várias vantagens para a indústria dos pneus nomeadamente:

- ✓ O aumento da capacidade produtiva, pelo facto de não haver a necessidade de armazenar o composto temporariamente entre cada processo;
- ✓ A otimização da dispersão e da distribuição da mistura;
- ✓ A diminuição significativa do tempo de silanização;
- ✓ Comparativamente com um misturador convencional do mesmo tamanho, a máquina *Tandem* requer uma potência menor [17].

3.6. Linha de mistura

Concluído o processo de misturação, o composto segue pela linha de mistura onde percorre uma série de equipamentos até ao seu armazenamento.

Extrusora e Calandra

Primeiramente, o composto dá entrada numa extrusora, passando posteriormente por uma calandra. A **Figura 3.8** mostra a configuração da extrusora e da calandra na máquina de misturação.

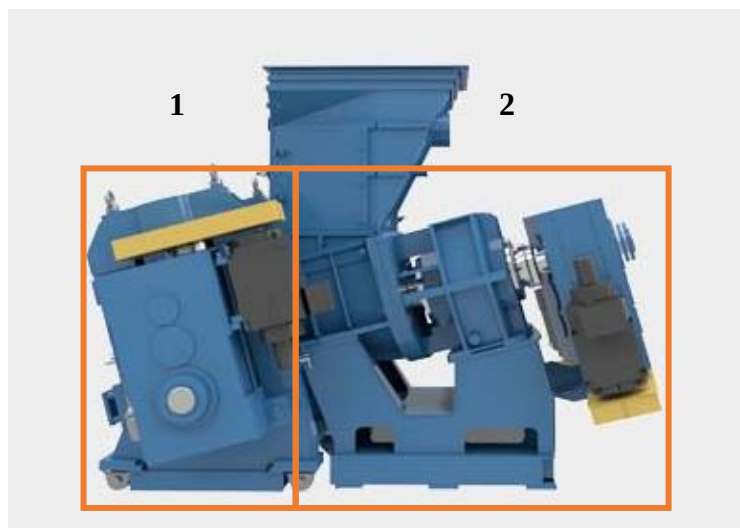


Figura 3.8 Configuração da extrusora (1) e da calandra (2) na máquina de misturação [26]

A extrusora encontra-se posicionada abaixo da porta de descarga do misturador e recebe o composto proveniente da câmara de mistura, realizando a sua homogeneização. Esta consiste em dois parafusos que rodam em sentidos opostos a uma velocidade variável conforme a quantidade de composto que está a ser processado. Estes parafusos possuem um controlo de temperatura, sendo que esta deve estar na ordem dos 70°C no caso de o composto apresentar sílica na sua composição e na ordem dos 40°C para compostos de negro de fumo. Isto deve-se ao facto de os compostos com sílica serem sensíveis a variações bruscas de temperatura [11].

De seguida, o composto proveniente da extrusão é encaminhado para uma calandra, onde é prensado por um conjunto de dois rolos sobrepostos, de modo a criar uma folha contínua com a espessura e largura desejadas. À semelhança dos restantes componentes da máquina, estes rolos possuem um controlo de temperatura, de maneira a manter a temperatura de ambos na ordem dos 50°C para compostos com sílica e dos 40°C para compostos sem sílica [11].

A **Figura 3.9** apresenta a configuração dos rolos da calandra na máquina de misturação.



Figura 3.9 Configuração dos rolos da calandra na máquina de mistura [26]

Moinho de homogeneização

O composto calandrado segue para o moinho composto por dois cilindros, cuja velocidade é variável e ajustável pelo operador durante o processo. Além dos cilindros, apresenta um conjunto de lâminas de corte que encaminham a borracha através de um rolo, redirecionando-a para o moinho, o que promove uma melhor homogeneização. Por fim, o composto é cortado nas dimensões desejadas e enviado na forma de folha contínua para o banho antiaderente. Mais uma vez, a temperatura dos cilindros é controlada, devendo o rolo frontal estar a 30°C, e o anterior a 60°C [11].

A **Figura 3.10** exibe a configuração dos rolos do moinho de homogeneização na máquina de mistura.



Figura 3.10 Configuração dos rolos do moinho de homogeneização na máquina de mistura [27]

Tanque de banho e *Batch-off*

Posteriormente, o composto é submetido a um banho com solução antiaderente, de modo a facilitar o seu empilhamento. Depois do banho, o composto passa por um sistema de secagem e é arrefecido por um sistema de ventiladores de funcionamento automático, apresentado na **Figura 3.11**. Esta etapa de secagem e arrefecimento é denominada de *batch-off* [11].



Figura 3.11 Configuração do tanque de banho antiaderente (1) e batch-off (2) [28]

Sistema de transporte e empilhamento

Por último, o composto é dirigido através de tapetes para a zona de empilhamento, onde será colocado em mesas próprias às camadas tal como se apresenta na **Figura 3.12**, pronto para ser transportado e armazenado para uso posterior. Por questões de segurança, o composto não deve estar a uma temperatura superior a 40°C no momento do seu empilhamento [11].



Figura 3.12 Empilhamento de um composto master/final [11]

Quanto ao layout da linha de mistura, os diferentes equipamentos que a constituem encontram-se distribuídos por diferentes andares, tal como representado na **Figura 3.13**.

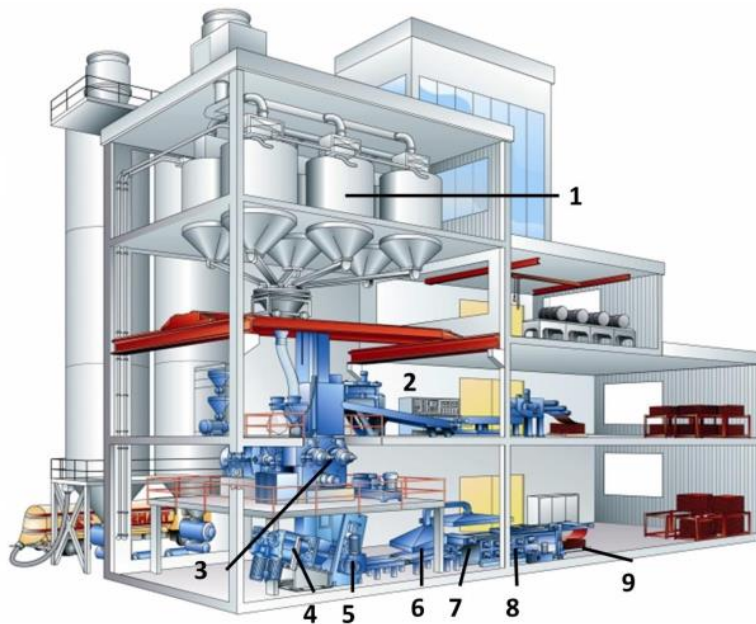


Figura 3.13 Layout da linha de mistura [29]

O número **1** representa os silos de armazenamento diário, onde são armazenadas matérias-primas como o negro de fumo, sílica e outros componentes granulosos ou líquidos. O número **2** representa o sistema de transporte e pesagem das restantes matérias-primas em bruto, como as borrachas e os pigmentos. Os números **3,4,5 e 6** representam o misturador, a extrusora, a calandra e o moinho de homogeneização, respetivamente. Os números **7,8 e 9** representam o banho antiaderente, o *batch-off* e o sistema de transporte e empilhamento, respetivamente.

Na Continental Mabor, o setor de misturação é composto por 12 linhas, enumeradas de #0 a #12, sendo que 8 delas possuem misturadores *Single* – da #0 à #7 – e 4 delas possuem misturadores *Tandem* – da #9 à #12.

3.7. Unidades de Controlo de Temperatura (TCU) do misturador

O controlo de temperatura é realizado por unidades de controlo de temperatura, mais conhecidas por TCU's.

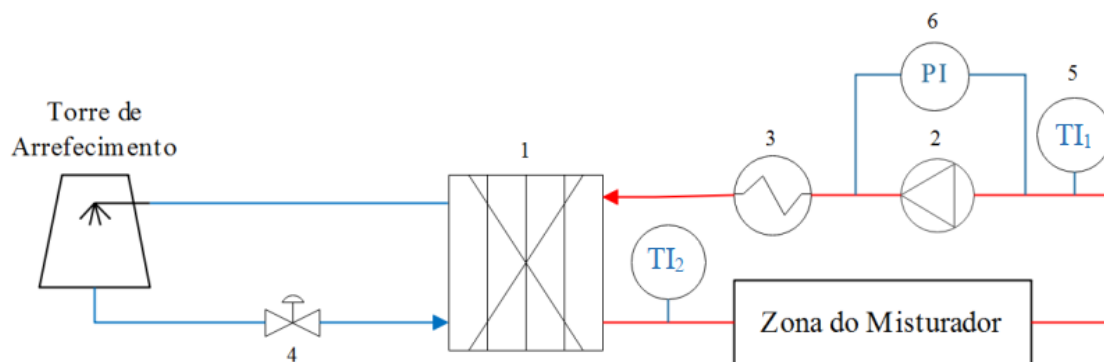
No misturador existem 4 zonas que são sujeitas a este controlo – corpo, rotores, porta de descarga e martelo pneumático – sendo que cada zona tem o seu circuito de água que circula entre o componente da máquina a arrefecer/aquecer e a respetiva TCU, ajustando a temperatura consoante as necessidades do processo. É fundamental que o sistema de controlo possua as seguintes características:

- Permitir uma temperatura ajustável da água de recirculação, entre 20°C e 80°C;
- Manter a temperatura da água de recirculação definida, *setpoint*, sendo admitidas variações máximas de $\pm 5^\circ\text{C}$ face a esse valor de referência;
- Cada zona deve ter um caudal de água suficiente para evitar gradientes de temperatura superiores a 2°C, que podem danificar a máquina a longo prazo [13].

Apesar das TCU's dos misturadores atuarem quer em situações de aquecimento quer de arrefecimento, a sua principal função é garantir o arrefecimento do misturador devido à elevada quantidade de calor gerado na compressão do composto [13].

O controlo de temperatura é realizado por um controlador proporcional integral derivativo, PID, tendo como variável controlada a temperatura da corrente de água de recirculação à saída do misturador, TI_1 , e como variáveis manipuladas o caudal da corrente de água de arrefecimento, proveniente da torre de arrefecimento, o caudal da corrente de água de recirculação e o calor gerado pela resistência [13].

Na **Figura 3.14** encontra-se representado o circuito de uma TCU.



Legenda

- | | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 – Permutador de placas | 4 – Válvula de controlo pneumático |
| 2 – Bomba centrífuga | 5 – Indicador de temperatura |
| 3 – Resistência elétrica On/Off | 6 – Indicador de pressão |

Figura 3.14 Esquema da TCU para uma zona do misturador [13]

4. Produção e consumo energético do setor de misturação

Neste capítulo é apresentado o levantamento da produção e consumo de energia elétrica do setor de misturação da Continental Mabor, efetuado de fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023.

Os dados da produção foram adquiridos no *MMS*, enquanto os consumos elétricos foram obtidos a partir do *MESDAS*.

4.1. Produção do setor de misturação

Todos os meses são produzidas milhões de toneladas de compostos na misturação. A produção mensal neste setor relativa ao período de fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023 encontra-se representada graficamente na Figura 4.1.

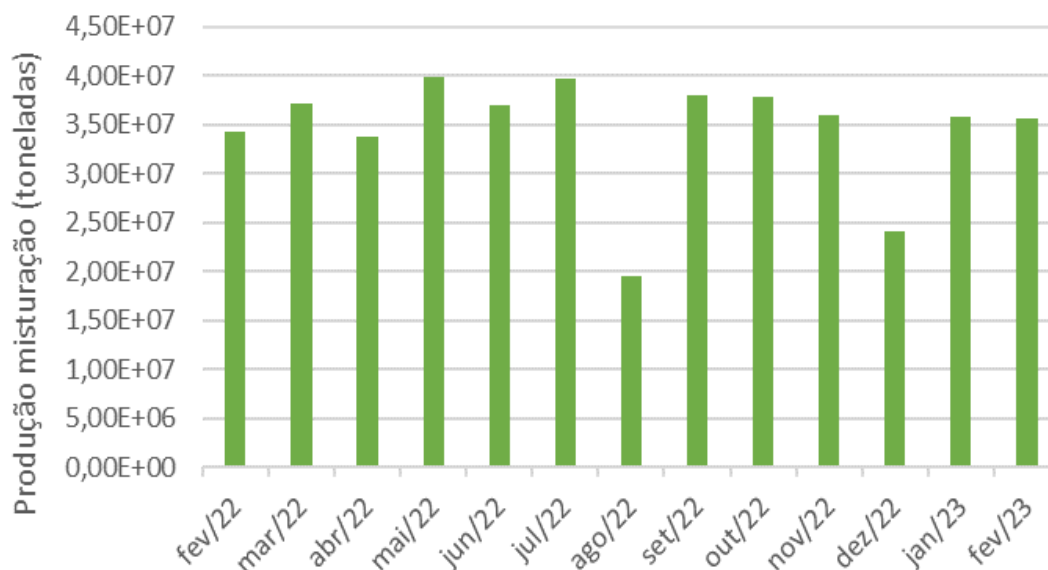


Figura 4.1 Produção mensal no setor de misturação desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023

Note-se que ao longo dos meses a produção no setor de misturação é relativamente constante. Os meses que se apresentam abaixo da média são agosto e dezembro, o que se

justifica pelo facto de terem ocorrido paragens para manutenção entre 10 e 19 de agosto e entre 21 de dezembro e 2 de janeiro.

O setor de misturação é constituído por 12 misturadores, dos quais alguns produzem compostos master – misturadores 2,4,5,6 e 7 – outros produzem compostos finais – misturadores 0, 1 e 3 – e os restantes são misturadores *tandem* que produzem *masters*, finais e *one step mixing* – misturadores 9, 10, 11 e 12. A **Figura 4.2** apresenta a produção por misturador desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023. Os misturadores *single* que produzem compostos *master* estão representados a verde, enquanto os *single* que produzem compostos finais estão representados a azul e os *tandem* a laranja.

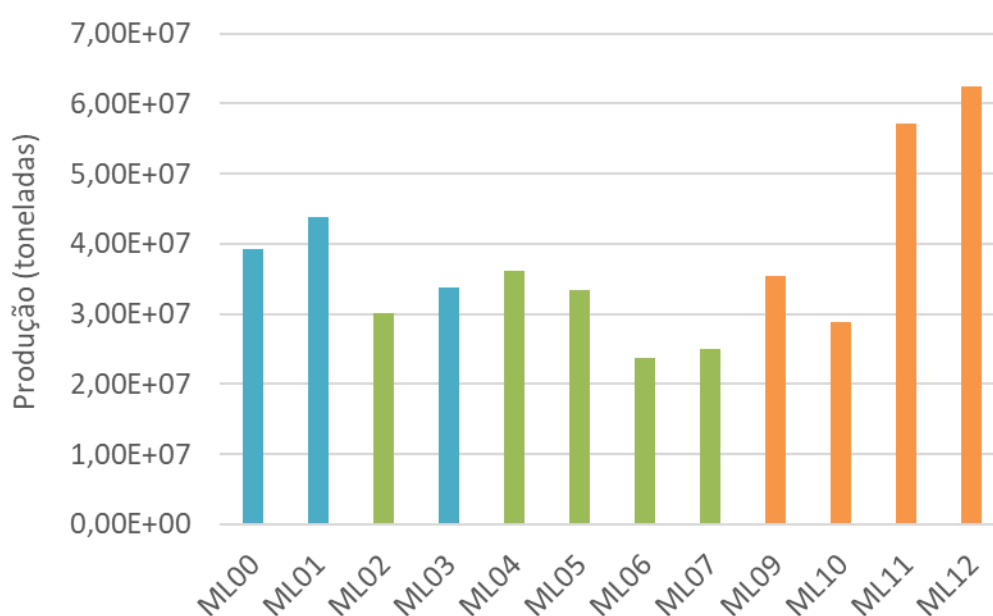


Figura 4.2 Produção por misturador desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023

Analisando a **Figura 4.2**, verifica-se que a produção dos misturadores 11 e 12 é superior à dos restantes. Isto, porque estes apresentam uma capacidade de produção mais elevada, sendo, por isso, chamados de *big tandem*. As diferenças de produção nos restantes misturadores relacionam-se com o tipo de composto produzido. Por norma, os misturadores que produzem compostos *master* apresentam menor produtividade do que os misturadores que produzem compostos finais, uma vez que o tempo de mistura de um composto *master* é superior ao de um composto final. Em compostos com sílica o tempo de mistura é ainda maior devido à reação de silanização.

4.2. Consumo elétrico do setor de misturação

A **Figura 4.3** demonstra a evolução do consumo elétrico do setor de misturação desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023. Estes dados encontram-se na forma de tabela no **Anexo A**.

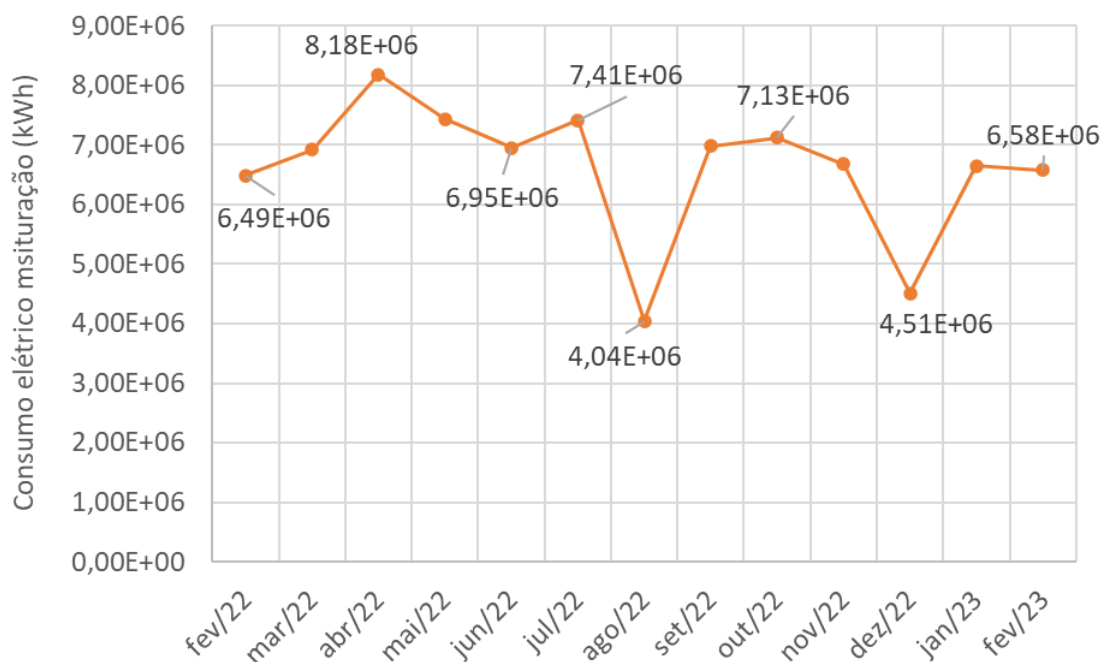


Figura 4.3 Evolução do consumo elétrico do setor de misturação de fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023

No mês de fevereiro de 2023, o setor de misturação apresentou um consumo elétrico de 6580,3 MWh e foi responsável por aproximadamente 43% do consumo elétrico total da fábrica, como se pode constatar pela **Figura 4.4**.

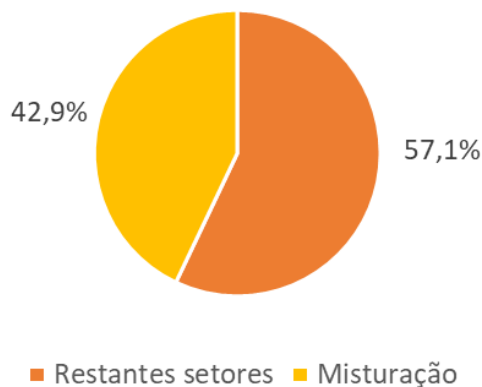


Figura 4.4 Representatividade da misturação no consumo elétrico total da fábrica em fevereiro de 2023

O consumo elétrico por linha de misturação desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023 é apresentado na **Figura 4.5**. Estes dados estão apresentados na forma de tabela no **Anexo A**.

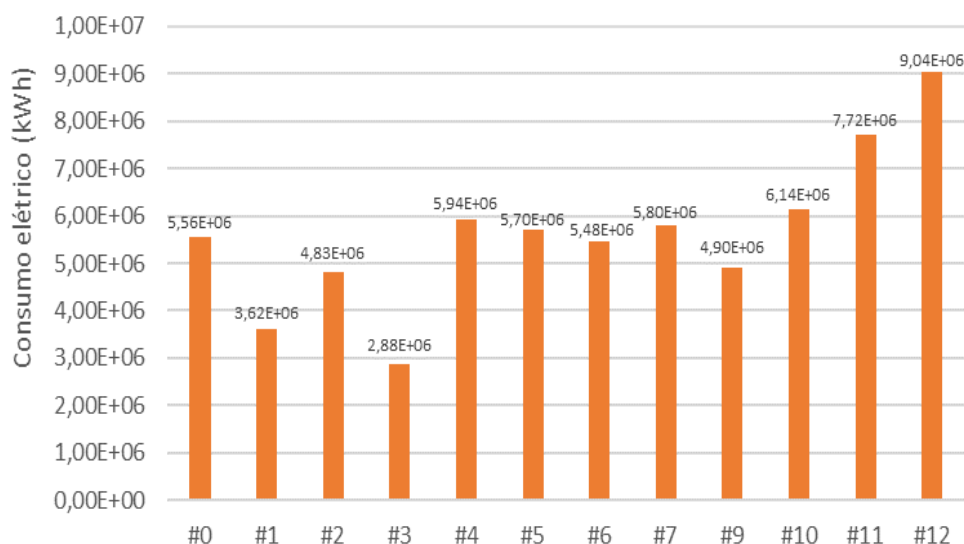


Figura 4.5 Consumo elétrico das linhas de misturação desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023

Tal como expectável, a **Figura 4.5** mostra que os maiores consumos de eletricidade estão associados às linhas que apresentam misturadores *big tandem*, #11 e #12.

Cada linha de misturação é composta por vários equipamentos que têm diferentes contributos para o consumo total de energia elétrica. Nas **Figuras 4.6 e 4.7** encontram-se as percentagens de consumo elétrico de todas as partes constituintes das linhas #10 e #12, respetivamente, no mês de fevereiro de 2023.

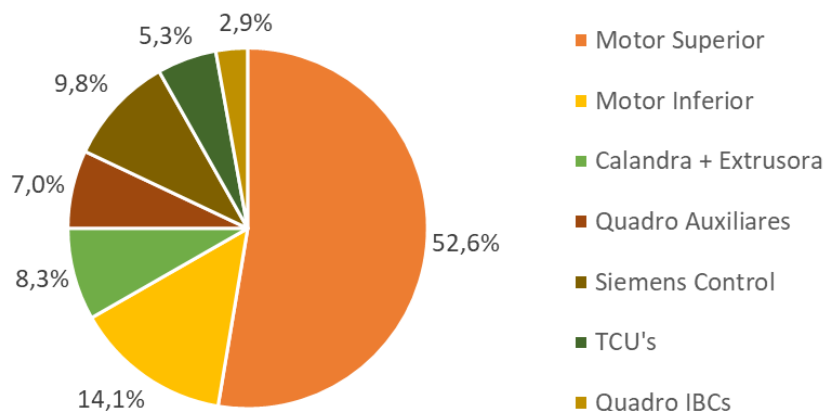


Figura 4.6 Percentagem de consumo elétrico dos equipamentos da linha #10 no mês de fevereiro de 2023

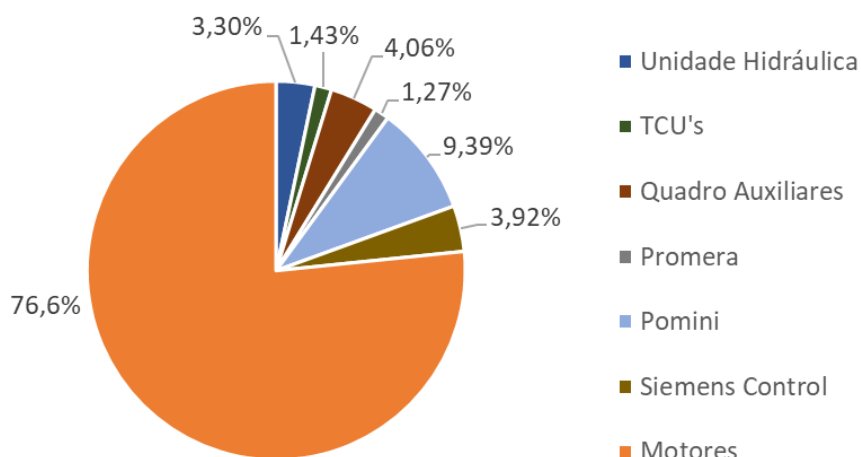


Figura 4.7 Percentagem de consumo elétrico dos equipamentos da linha #12 no mês de fevereiro de 2023

Estes dados encontram-se na forma de tabela no **Anexo A**.

Face aos resultados apresentados pode constatar-se que os grandes consumidores de energia do setor de misturação são os motores dos misturadores, representando 66,7% do consumo elétrico total na linha #10 e 76,6% na linha #12.

Por este motivo, os motores dos misturadores devem ser alvo de especial atenção no que respeita ao consumo de energia e à sua otimização.

5. Validação de dados de Energia no *MMS*

O objetivo da primeira parte deste trabalho é validar os dados de energia adquiridos no *MMS*. Como já foi referido, o *MMS* é o sistema de monitorização dos parâmetros de mistura utilizado pelo DIP.

O DIP utiliza a informação do *MMS* para monitorizar e melhorar continuamente a qualidade do processo de mistura dos compostos, mas não tem como prioridade melhorar a sua eficiência energética, por isso, o parâmetro de energia não foi, até ao momento, alvo de muita atenção. Além disso, existia a dúvida sobre se os valores de energia registados no *MMS* estariam ou não corretos.

Assim, este projeto advém do interesse que o DIP tem em começar a implementar medidas que visem reduzir o consumo de energia pelos motores dos misturadores. Para tal, o primeiro passo é validar este parâmetro no *MMS*.

O DEI é responsável pela gestão e projetos de energia, sendo a eficiência energética uma das suas principais diretrizes. O *MESSDAS* é o sistema de gestão de energia utilizado por este departamento e, como tal, tem credibilidade para ser uma ferramenta de validação dos dados de energia do *MMS*.

Começou-se por fazer um estudo prévio dos dois *softwares* de aquisição de dados, com o objetivo de compreender o cálculo da energia elétrica consumida e o modo como os dados são comunicados e registados nos respetivos programas. Depois, prosseguiu-se com a recolha e tratamento dos dados de consumo elétrico dos motores dos misturadores e, por último, foi desenvolvido um método de comparação adequado e analisaram-se os resultados obtidos.

5.1. Estudo prévio dos *softwares*

Os dados de energia elétrica são obtidos a partir de contadores de energia elétrica. Estes dispositivos eletrónicos medem a tensão (**V**) e a corrente (**I**) dos transformadores

de tensão (TT) e corrente (TI) instalados no circuito elétrico e através destes parâmetros calculam a potência ($P = V \times I$) e a energia ($E = P \times \text{Tempo}$). No esquema da **Figura 5.1** apresentam-se as variáveis de entrada e de saída do contador.



Figura 5.1 Entradas e saídas do contador de energia elétrica

A comunicação dos dados do contador para outros dispositivos é feita através de uma ligação contador/Servidor. Esta ligação depende do tipo de contador. Se o contador for compatível com a comunicação por *Ethernet* pode ser diretamente ligado ao *Switch*, dispositivo que conecta todos os elementos da rede, e depois ao servidor. Caso contrário, o contador liga-se por RS-485 a um conversor, utilizando um protocolo de comunicação, e posteriormente liga-se ao servidor por *Ethernet*. No esquema da **Figura 5.2** podem observar-se as possíveis ligações contador/Servidor.

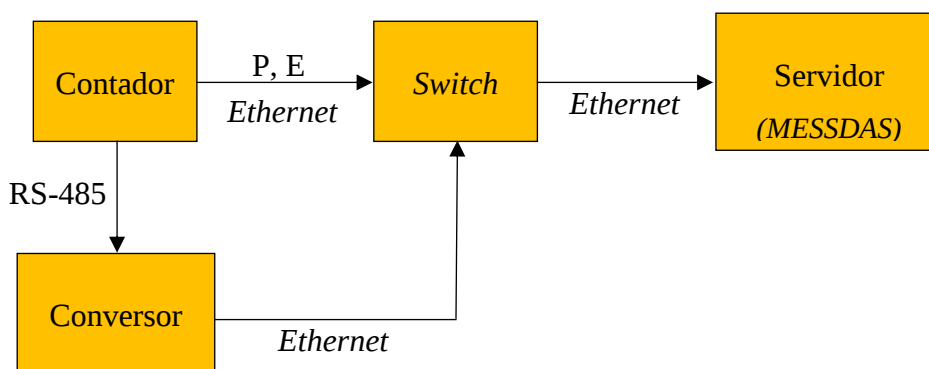


Figura 5.2 Esquema representativo da ligação entre o contador e o MESSDAS

As máquinas de misturação são abrangidas pelo protocolo de comunicação *M-Bus* (*Meter-Bus*), que é do tipo mestre/subordinado, em que o mestre – o concentrador – inicia a comunicação e os subordinados – os contadores – respondem com os dados solicitados. O tempo de ciclo é o tempo que demora desde que o mestre envia uma “pergunta” até que os subordinados respondam e é tanto maior quanto maior for o número de subordinados.

O *MESSDAS* indica qual é o protocolo de comunicação em vigor para cada local da fábrica, bem como o número total de contadores, o número de contadores em falha e o tempo de ciclo. Esta informação pode ser encontrada no **Anexo B.1**. A título de exemplo, o quadro de média tensão do posto de transformação 10 apresenta 14 contadores, havendo 1 em falha, e o tempo de ciclo é de 29 segundos. Mais tarde, veio a descobrir-se que esta falha era uma avaria no contador do motor inferior do misturador 11.

O registo dos valores na base de dados do *MESSDAS* é feito através de *TAG's*. Cada *TAG* está associada a um parâmetro de um contador de energia. O *MESSDAS* permite a visualização gráfica de uma ou mais *TAG's* num período de tempo selecionado. A título exemplificativo, a **Figura 5.3** mostra o consumo elétrico total em kWh dos motores do misturador 10, no dia 31 de março de 2023 das 15:45 às 16:00. O retângulo destacado a vermelho contém as *TAG's* de energia consumida pelo motor superior (“TRF Motor Mix 10 320 z”) e pelo motor inferior (“TRF Motor Mix 10 520 z”) do misturador 10. A última *TAG* corresponde à soma das duas anteriores e é a que aparece representada no gráfico.

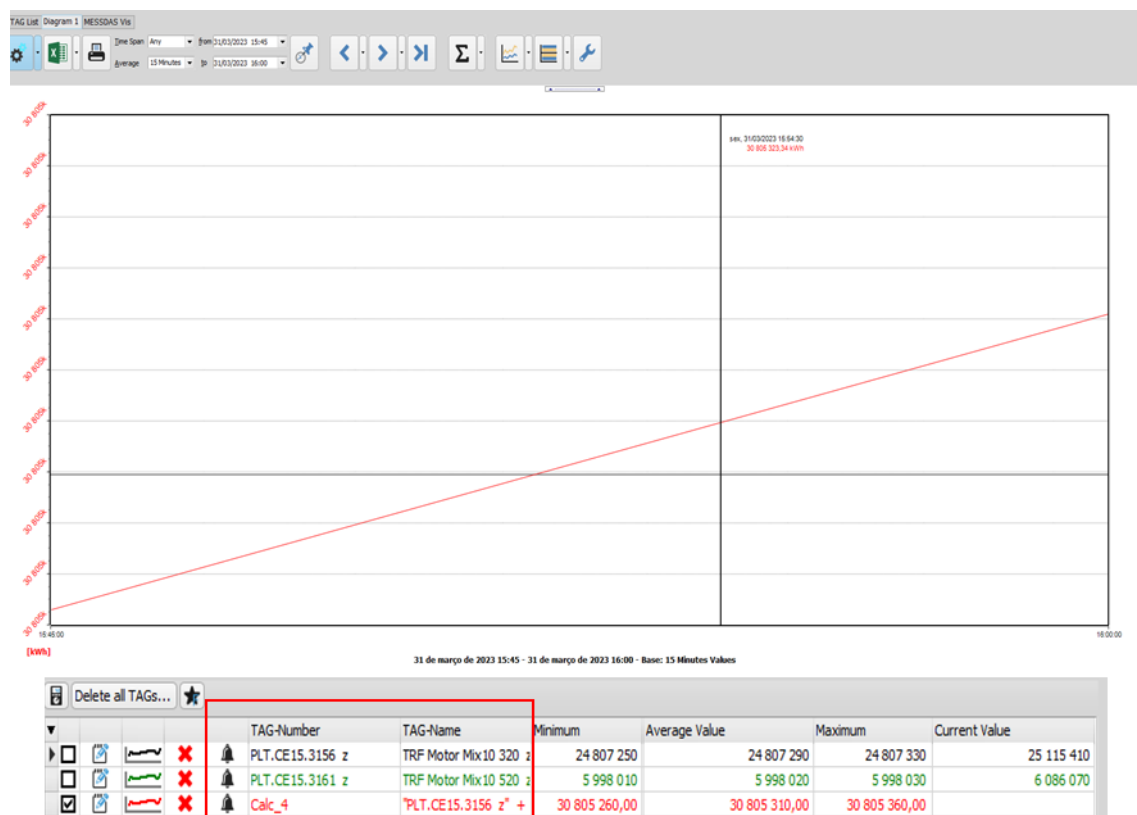


Figura 5.3 Visualização gráfica do consumo elétrico total dos motores do misturador 10 no MESSDAS

O cálculo e comunicação dos dados de energia é feito de forma totalmente diferente no *MMS*.

Cada composto tem uma receita no *MMS* que define não só a pesagem das matérias-primas como também os parâmetros de mistura para cada etapa do processo. No início da carga, o *Main Mixer Control System (MMCS)* recebe a receita proveniente do *MMS*. O *MMCS* é um controlador lógico programável (*PLC*) e é responsável pelo controlo de um misturador, sendo que cada um tem o seu. Por sua vez, o *Main Drive* ajusta o output do motor de acordo com a informação recebida do *MMCS*. É o *PLC* do *Main Drive* que calcula a energia consumida pelo motor através de impulsos. Cada impulso equivale a um valor de energia definido e ao multiplicar o número de impulsos por esse valor, obtém-se a energia que é consumida durante a carga. Os dados são transmitidos do *Main Drive* para o *MMCS*, ao abrigo dos protocolos de comunicação *Profibus* ou *Profinet* (dependendo do misturador) e destes para o *MMS*, utilizando o protocolo *Open Platform Communication (OPC)*.

As ligações motor principal/*MMS* estão representadas no esquema da **Figura 5.4**.

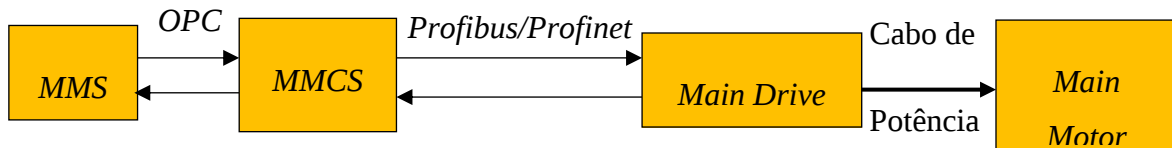


Figura 5.4 Esquema representativo da ligação entre o motor de um misturador e o *MMS*

A temperatura, potência, energia, torque, velocidade dos rotores, pressão e percurso do martelo são registados no *MMS* para cada carga de composto, quer na forma de gráfico ao longo do tempo da carga – *batch curves* – quer na forma de tabelas que apresentam o *target* (valor estipulado pela receita) e o valor real de cada parâmetro para cada fase do processo.

A **Figura 5.5** apresenta a curva de energia da carga 1 do composto FMF-T16734B que foi produzida no misturador 10, no dia 31 de março de 2023 das 15h50 às 15h52.

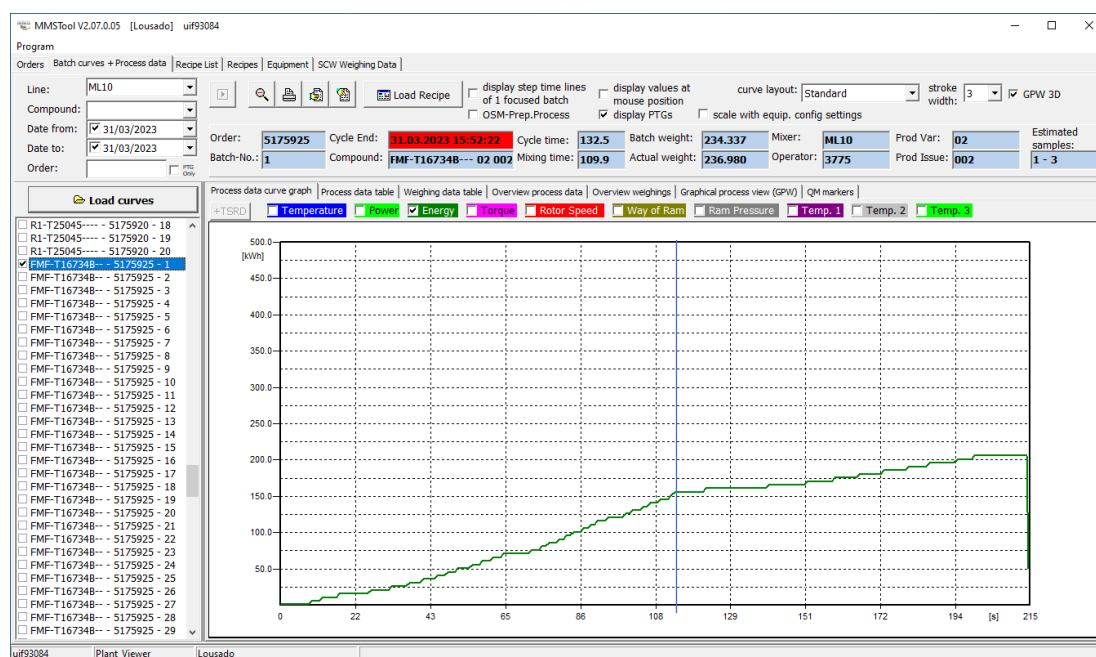


Figura 5.5 Visualização gráfica do consumo elétrico dos motores do misturador 10 no MMS

De salientar as diferenças entre *MESSDAS* e *MMS* a ter em consideração:

- No caso do *MESSDAS*, o registo da energia consumida é contínuo. No caso do *MMS*, o registo não é contínuo, ocorre apenas durante o tempo da carga.
- No *MESSDAS* o registo de energia é sempre cumulativo, enquanto no *MMS* é cumulativo dentro da mesma carga, mas “zera” no início de cada carga.
- No *MESSDAS* pode optar-se por visualizar os dados num gráfico de barras, em que cada “barra” representa a energia consumida entre o registo anterior e o atual. Desta forma, o registo deixa de ser cumulativo.
- A curva de energia no *MMS* só diz respeito ao consumo elétrico dos motores dos misturadores, enquanto no *MESSDAS* existem *TAG's* alusivas às várias partes das linhas de misturação, tal como já se viu no **capítulo 4**.
- Quando se trata de um misturador *tandem*, o *MMS* não separa as curvas de energia do motor superior e inferior, mas é possível observar esta transição assinalada com uma reta azul vertical na **Figura 5.5**. Enquanto o composto está na câmara superior, o processo de mistura exige mais energia, o que se reflete num declive superior, e a partir do momento em que o composto passa para a câmara inferior, o consumo de energia baixa, o que se traduz num declive inferior. No *MESSDAS*,

cada motor de misturador tem a sua *TAG*, à exceção do misturador 12, que apresenta numa só *TAG* o total do consumo elétrico dos dois motores.

O funcionamento dos dois *softwares* foi explicado mais pormenorizadamente no **Anexo B.1.**

5.2. Recolha, tratamento e comparação dos dados

Depois de explorar todas as funcionalidades dos *softwares*, procedeu-se à recolha dos dados. Tal como referido anteriormente, os dados de energia do *MMS* referem-se ao consumo dos motores dos misturadores, pelo que os dados a recolher do *MESSDAS* têm de ser os mesmos. Para tal, foi necessário descobrir no *MESSDAS* as *TAG*'s associadas aos motores de cada misturador, que se encontram no **Anexo B.1.**

Os dois sistemas permitem exportar os valores em kWh das curvas de energia para o Excel. No *MMS* os dados foram exportados de 1 de maio de 2022 a 31 de março de 2023, para os misturadores 5, 6, 7, 10, 11 e 12. Nos restantes misturadores, o parâmetro de energia não faz parte do controlo no *MMS*, pelo que estes não foram incluídos neste trabalho. Importa referir que os misturadores têm sistemas de controlo de diferentes gerações, sendo que os mais antigos não permitem a obtenção de algumas variáveis no *MMS*, como é o caso da energia consumida pelo motor.

No ficheiro Excel, os valores de energia são apresentados de segundo a segundo, ao longo do tempo da carga.

A recolha de dados do *MESSDAS* seguiu os mesmos critérios. Neste caso, é ainda necessário escolher uma base de tempo com que os dados são retirados: 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 1 dia, 1 semana, 1 mês e 1 ano. A escolha da base de tempo foi importante porque foi também a base de tempo usada para comparar os dados entre programas. Por esse motivo, escolheu-se uma base de tempo não muito longa nem muito curta, de modo que o número de resultados obtidos fosse aceitável. Optou-se por uma base de 1 hora.

Relativamente ao tratamento dos dados provenientes do *MMS*, calculou-se o pico máximo de energia para cada carga, que corresponde à energia total consumida pelo(s) motor(es) durante a carga. Nos dados provenientes do *MESSDAS*, cada valor corresponde ao consumo elétrico do motor do misturador durante 1 hora. No caso dos misturadores 10 e 11, em que existe uma *TAG* para cada motor, foi necessário somar o consumo dos dois motores para cada período de 1 hora.

Ao contrário do *MESSDAS*, os valores exportados do *MMS* não estão associados a uma hora. Para que mais tarde fosse possível aplicar o método de comparação, cada carga foi associada a uma hora de início e de fim. Para tal, fez-se uma correspondência exata dos dados do *MMS* com os relatórios de produção, com base no misturador, na ordem, no composto, no número da carga e na data.

O método de comparação desenvolvido pretende comparar os dados de energia do *MMS* e do *MESSDAS* no mesmo período de tempo – 1 hora – e no mesmo misturador. Primeiramente, fez-se corresponder à data/hora de início dos dados do *MESSDAS* a data/hora de início mais próxima dos dados do *MMS* e fez-se o mesmo para a data/hora de fim. De seguida, somaram-se os valores de energia do *MMS* compreendidos no período entre data/hora de início e data/hora de fim criados no passo anterior, obtendo-se assim um único valor do *MMS* para cada valor do *MESSDAS*. No entanto, nem todos os valores obtidos são válidos pelas seguintes razões:

- Tempo total: Nem todos os períodos do *MMS* têm a duração pretendida de 1 hora. A comparação de valores de energia só é válida para períodos de tempo iguais ou muito próximos. Para esse efeito, considerou-se um filtro de 1 hora $\pm$ 30 segundos;
- Tempo entre cargas: O tempo entre cargas é calculado pela diferença entre o tempo total e o tempo de cargas. Como já foi explicado, o registo no *MMS* é feito durante cargas e no *MESSDAS* é contínuo. Por consequência, para períodos que incluem intervalos entre cargas, o valor do *MESSDAS* será significativamente maior do que o valor do *MMS*. Para evitar este erro, aplicou-se um filtro de tempo entre cargas igual ou inferior a 10 minutos;
- Diferença da hora de início: Apesar de se ter correspondido à data/hora de início dos dados do *MESSDAS*, a data/hora de início mais próxima dos dados do *MMS*,

há sempre uma diferença entre as horas de início correspondidas. Dado que a comparação deve ser feita para a mesma hora, usou-se um filtro de diferença da hora de início entre *MESSDAS* e *MMS* igual ou inferior a 10 minutos.

É evidente que o ideal seria comparar períodos de 1 hora, em que as horas de início e fim do *MMS* e do *MESSDAS* fossem iguais, e em que não existissem tempos de pausa entre cargas. No entanto, as discrepâncias de tempos entre os programas impossibilitam a correspondência exata dos mesmos.

O procedimento completo de recolha e tratamento de dados, bem como a explicação mais detalhada do método de comparação está presente no **Anexo B**.

5.3. Resultados

As **Figuras 5.6 a 5.11** mostram o **consumo elétrico dos motores em períodos de 1 hora** no *MESSDAS* e no *MMS*. Os resultados apresentados nestas figuras, a título elucidativo, dizem respeito aos misturadores 10, 11, 12, 5, 6 e 7, respetivamente, e aos últimos dias do mês de março, à exceção do misturador 11, em que se mostram os valores para os primeiros dias do mês de agosto.

No **Anexo B.4** encontram-se os resultados referentes ao mês de março e ao mês de agosto, no caso do misturador 11.

De reiterar que a análise foi feita para o período de 1 de maio de 2022 a 31 de março de 2023. De referir ainda que a avaria detetada no contador de energia do motor inferior do misturador 11 ocorreu no dia 25 de agosto de 2022, pelo que a análise para este misturador foi feita apenas no período de 1 de maio a 24 de agosto de 2022.

Para o período de análise referido fez-se a média dos consumos elétricos dos motores e determinou-se o desvio relativo médio usando a **Equação 5.1**.

$$\text{Desvio relativo médio} = \frac{\sum \frac{|\text{Valor MESSDAS} - \text{Valor MMS}|}{\text{Valor MESSDAS}}}{\text{Número de observações}} \quad (\text{Equação 5.1})$$

Para evitar o excesso de informação ao visualizar os resultados obtidos, optou-se por fazer uma representação gráfica num curto período de tempo. O eixo horizontal corresponde à hora de fim do *MESSDAS* para cada um dos dias aí referidos.

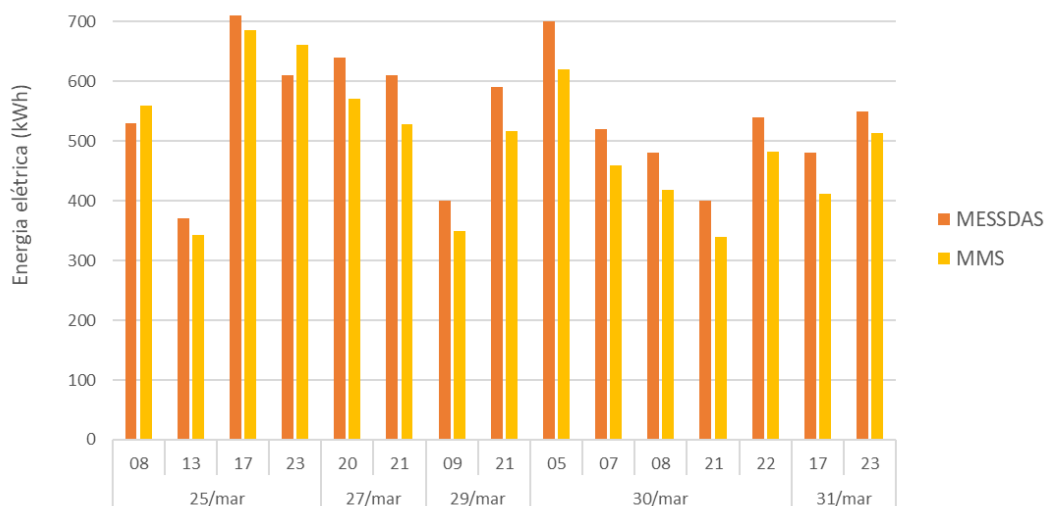


Figura 5.6 Consumo elétrico dos motores do misturador 10

No misturador 10 verificaram-se consumos energéticos médios de 529,01 kWh no *MESSDAS* e de 489,01 kWh no *MMS*, e um desvio relativo médio de 16,87%.

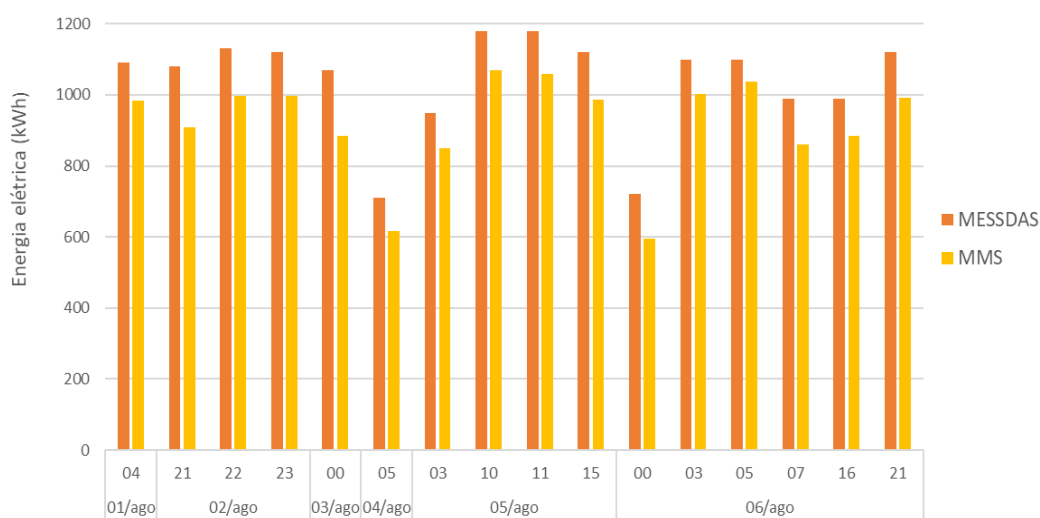


Figura 5.7 Consumo elétrico dos motores do misturador 11

No misturador 11 obtiveram-se consumos de energia, em média, de 831,90 kWh no *MESSDAS* e de 744,48 kWh no *MMS*, e um desvio relativo médio de 12,42%.

Repare-se que o consumo elétrico médio deste misturador é claramente superior ao do misturador 10, pelo facto de se tratar de um *big tandem*.

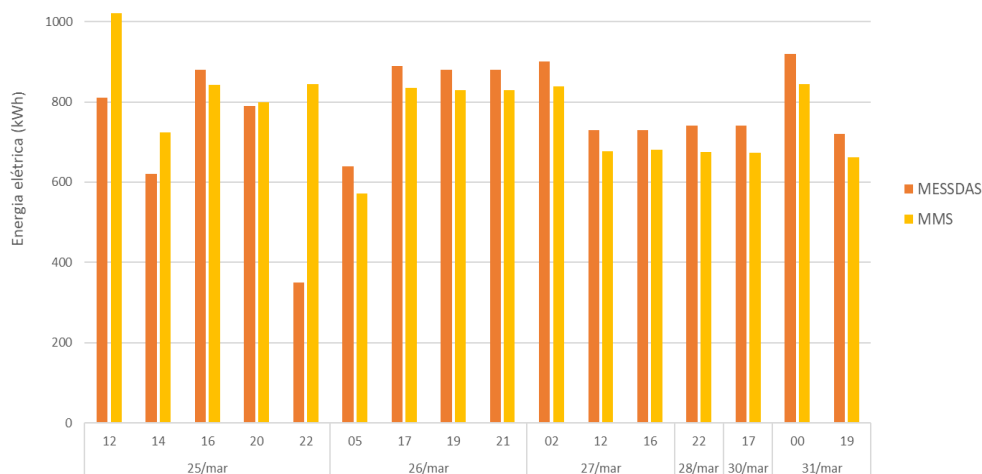


Figura 5.8 Consumo elétrico dos motores do misturador 12

A energia consumida no período de 1 hora pelos motores do misturador 12 ronda, em média, os 844,53 kWh no *MESSDAS* e os 808,50 kWh no *MMS*, e apresenta um desvio relativo médio de 9,78%.

Mais uma vez, sendo um *big tandem*, este misturador tem consumos energéticos significativamente maiores do que o misturador 10.

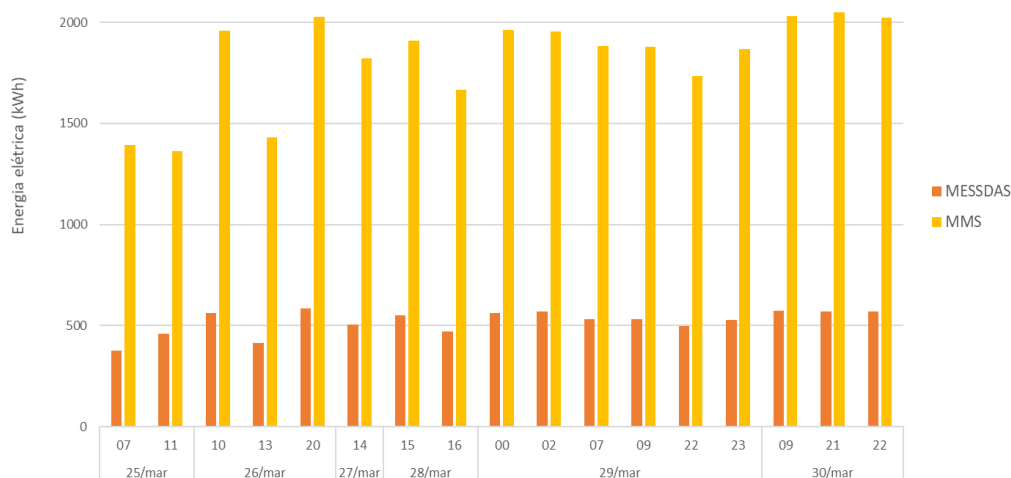


Figura 5.9 Consumo elétrico do motor do misturador 5

Por sua vez, o misturador 5 regista consumos elétricos médios de 479,88 kWh no *MESSDAS* e de 1746,05 kWh no *MMS*, obtendo-se um desvio relativo médio de 272,37%.

Os valores adquiridos no *MESSDAS* vão de encontro ao que se espera do consumo de energia de um misturador *single*. Pelo contrário, os valores do *MMS* são anormalmente altos.

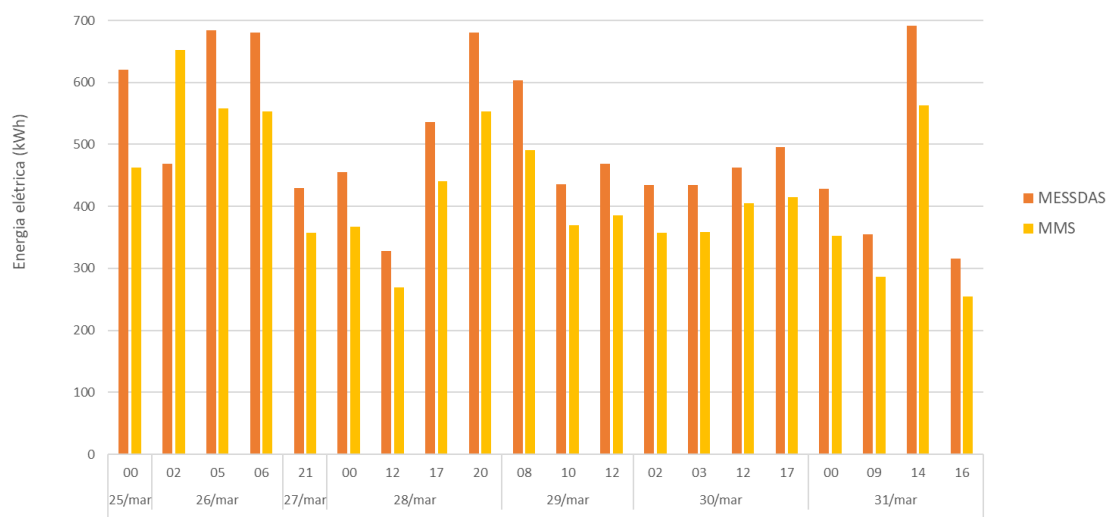


Figura 5.10 Consumo elétrico do motor do misturador 6

O misturador 6 apresentou, em média, um consumo de 467,98 kWh no *MESSDAS* e 420,10 kWh no *MMS*, e um desvio relativo médio de 17,71%.

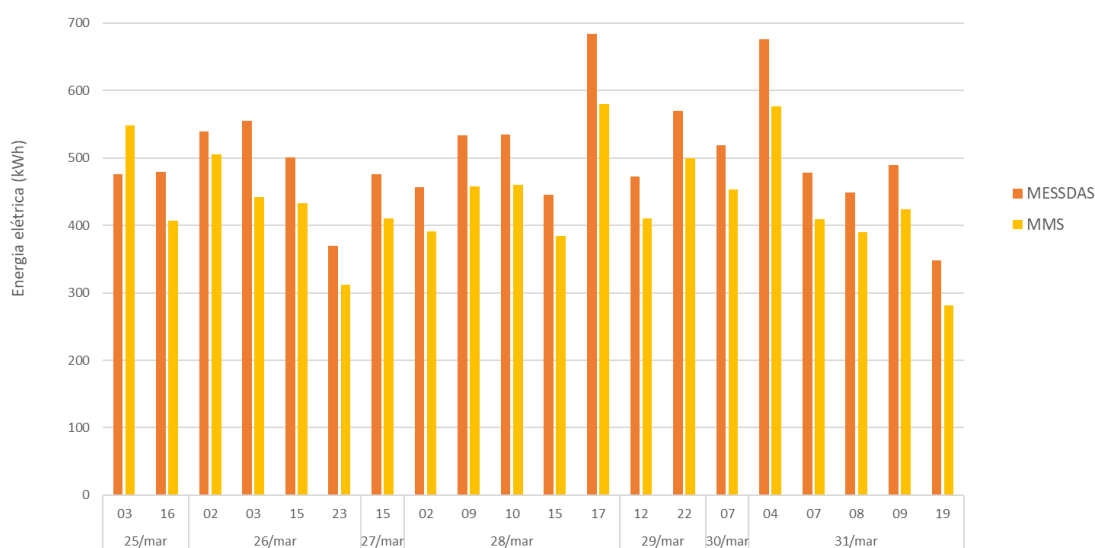


Figura 5.11 Consumo elétrico do motor do misturador 7

O consumo energético médio do motor do misturador 7 no período de 1 hora é de 477,95 kWh no *MESSDAS* e de 433,77 kWh no *MMS*, o que resulta num desvio relativo médio de 17,91%.

A **Tabela 5.1** resume os resultados mostrados anteriormente para cada misturador.

Tabela 5.1 Resumo dos resultados: média MESSDAS, média MMS e desvio relativo médio

	ML05	ML06	ML07	ML10	ML11	ML12
<i>Tipo</i>	single	single	single	tandem	Big tandem	Big tandem
<i>Média MESSDAS (kWh)</i>	479,88	467,98	477,95	529,01	831,90	844,53
<i>Média MMS (kWh)</i>	1746,05	420,10	433,77	489,01	744,48	808,50
<i>Desvio relativo médio (%)</i>	272,37	17,71	17,91	16,87	12,42	9,78

Tal como expectável, no mesmo período de tempo, os misturadores *single* – 5, 6 e 7 – consomem menos energia do que o *tandem* – 10 – e do que os *big tandem* – 11 e 12.

Repare-se que em grande parte dos resultados, a energia obtida pelo *MESSDAS* é superior. Nos períodos de 1 hora a máquina pode estar a produzir, havendo um maior consumo de energia, ou pode estar parada entre cargas, existindo, ainda assim, um ligeiro consumo de energia. Como já se referiu, ao contrário do *MESSDAS*, o *MMS* não calcula a energia consumida entre cargas. Apesar de se ter imposto um limite máximo de tempo entre cargas de 10 minutos, verificam-se, mesmo assim, pequenos acréscimos nos valores de energia do *MESSDAS* face aos valores de energia do *MMS*.

Desta primeira análise pode concluir-se que os resultados do *MMS* estão próximos dos resultados do *MESSDAS*, exceto no misturador 5.

Estes resultados foram participados ao Departamento de Engenharia 1, responsável pelo setor de mistura. No sentido de corrigir o desvio verificado no misturador 5, ficou planeada para breve uma calibração do *PLC* do *main drive* do motor desta máquina. Posto isto, o misturador 5 não foi tido em conta na análise realizada nos **subcapítulos 5.3.1 e 5.3.2**.

5.3.1. Análise das correlações obtidas

Na tentativa de relacionar os dados de energia do *MMS* e do *MESSDAS* aplicou-se o modelo de regressão linear, o que resultou na equação da reta e respetivo coeficiente de correlação (r^2). O resultado destas correlações é apresentado no **Anexo B.4.1** e constituiu uma análise preliminar do tratamento de dados efetuado.

A partir daí fez-se uma análise gráfica da dispersão dos pontos obtidos. Para isso, marcaram-se os pontos num gráfico, onde se incluiu a reta correspondente à bisetritz do 1º quadrante, e a partir dela traçaram-se duas retas que passam pela origem dos eixos e que apresentam um desvio de $\pm 20\%$ relativamente à bisetritz.

A título exemplificativo, a **Figura 5.12** mostra o gráfico de dispersão dos pontos para o misturador 10.

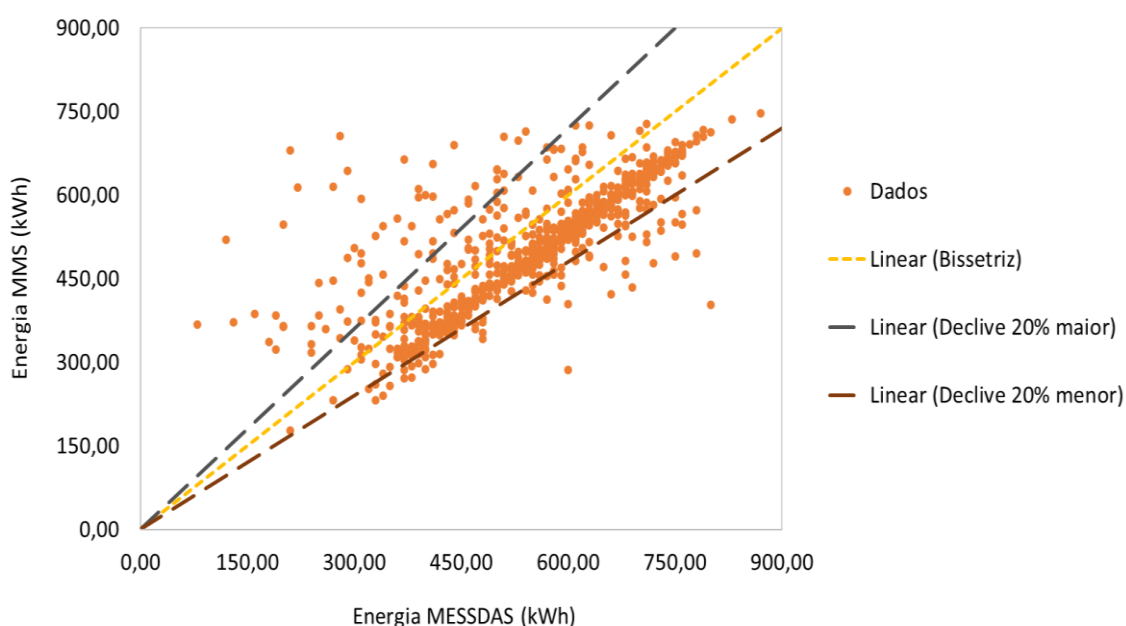


Figura 5.12 Dispersão dos pontos para o misturador 10

Observando a **Figura 5.12**, verifica-se que os valores de energia do *MESSDAS* são, no geral, superiores aos do *MMS*, pois a maioria dos pontos encontra-se abaixo da bisetritz.

Como já se previa pelo desvio relativo médio de 16,87%, a grande parte dos pontos é compreendida pelos limites estabelecidos.

Com vista a melhorar a qualidade da regressão linear eliminaram-se os pontos que não pertencem à área delimitada pelas linhas, ou seja, dados com um desvio relativo maior do que 20%.

Os resultados das regressões obtidas para os misturadores 10, 11, 12, 6 e 7 apresentam-se nas **Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17**, respetivamente.

A **Figura 5.13** apresenta 706 pontos e resultou da eliminação de 15% da totalidade dos pontos da **Figura 5.12**.

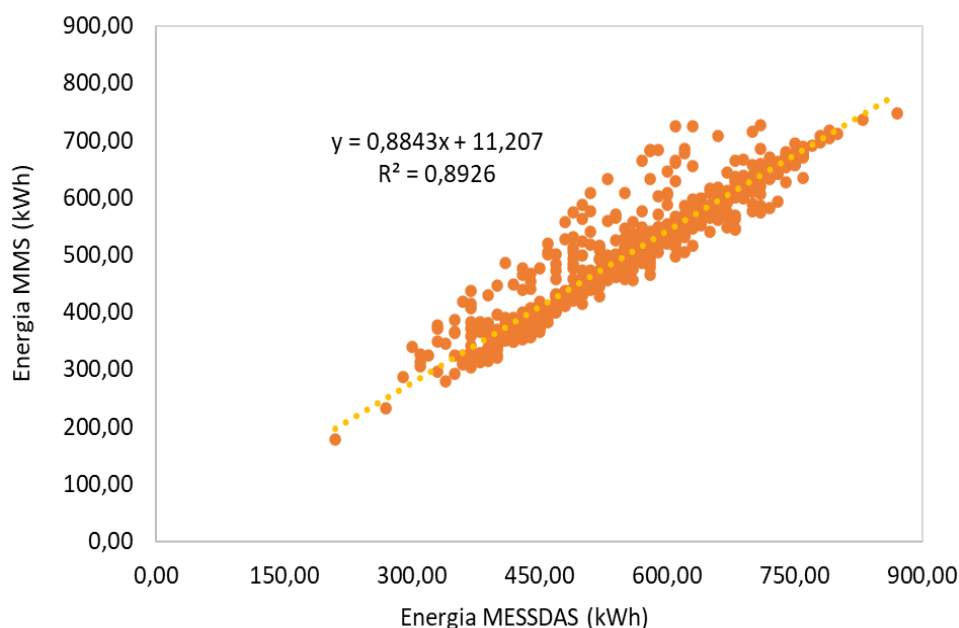


Figura 5.13 Regressão linear para o misturador 10

Efetivamente, com esta correção obteve-se uma boa regressão linear com um r^2 que aumentou para 0,8926.

Para o misturador 11 o resultado está apresentado na **Figura 5.14**.

De lembrar que o número mais reduzido de pontos é devido ao facto de o período de análise ter sido mais curto do que o dos restantes misturadores.

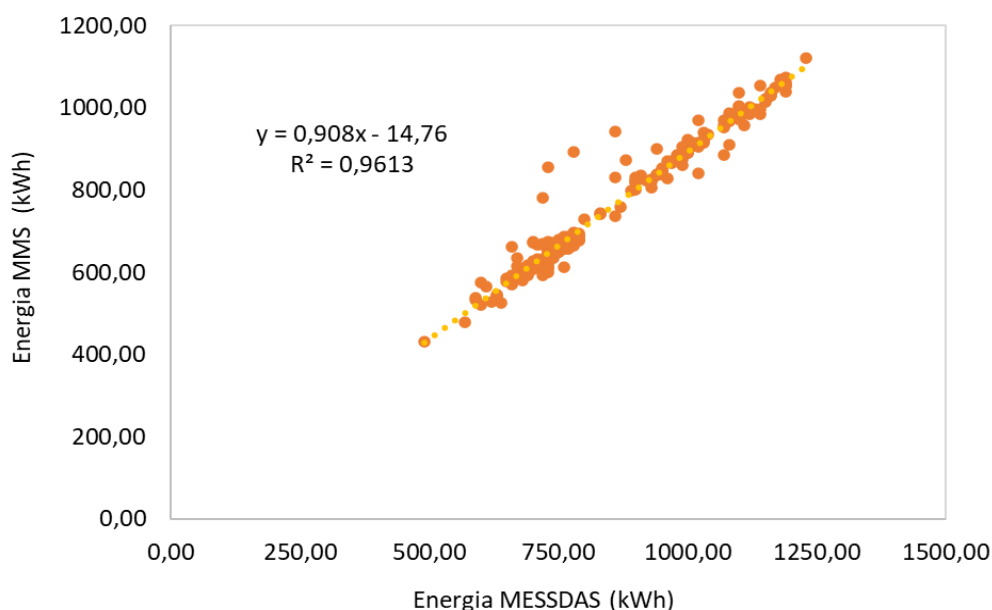


Figura 5.14 Regressão linear para o misturador 11

Apesar de se ter obtido uma boa regressão linear, esta conta com apenas 278 pontos, sendo que foram eliminados 6 pontos de desvio relativo superior a 20%.

A **Figura 5.15** apresenta os resultados finais obtidos para o misturador 12.

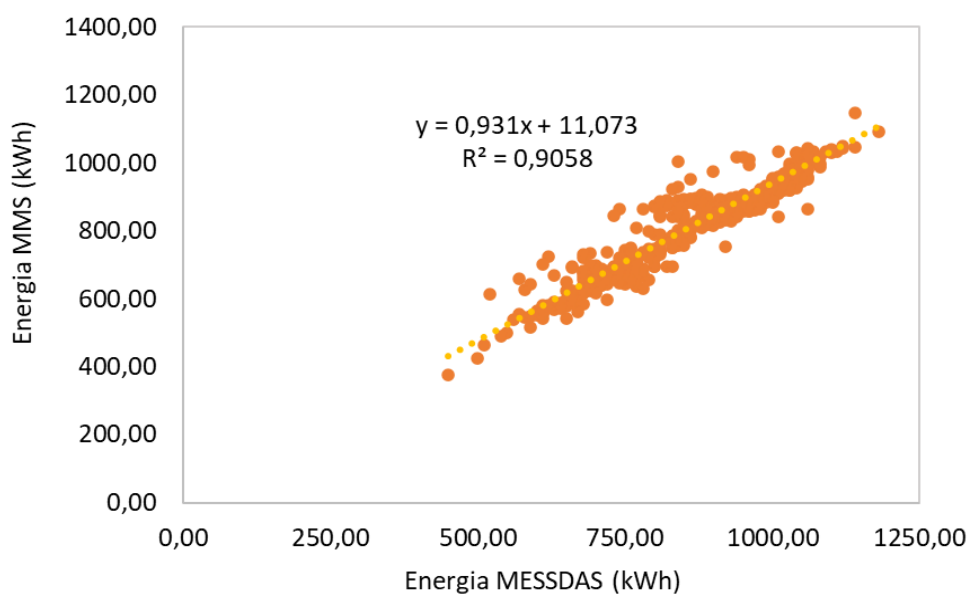


Figura 5.15 Regressão linear para o misturador 12

No que diz respeito ao misturador 12, foi necessário remover 5% da totalidade de pontos, restando ainda 582 pontos que se ajustam à reta com um r^2 de 0,9058.

De seguida, apresentam-se na **Figura 5.16** os resultados para o misturador 6.

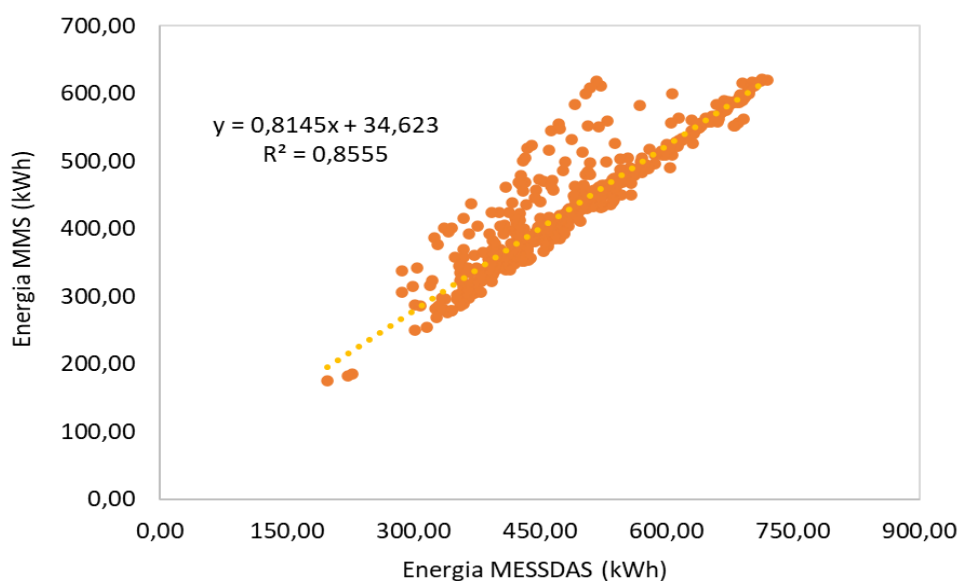


Figura 5.16 Regressão linear para o misturador 6

A regressão linear para o misturador 6 apresenta 654 pontos, tendo sido resultado da eliminação de 15% da totalidade dos pontos.

Por último, na **Figura 5.17** apresenta-se a correlação obtida para o misturador 7.

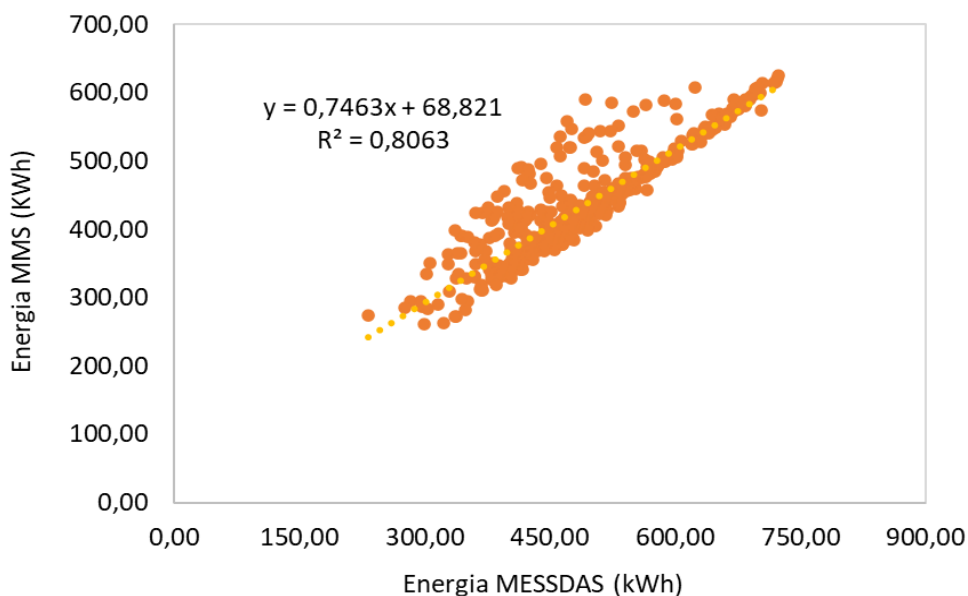


Figura 5.17 Regressão linear para o misturador 7

O ajuste linear dos dados do misturador 7 tem 606 pontos, tendo sido excluídos 14% dos pontos iniciais.

Em suma, através da análise das correlações obtidas pode concluir-se que o ajuste linear é bom nos misturadores 10, 11 e 12, uma vez que os pontos se encontram próximos da reta e não tão bom nos misturadores 6 e 7, pois existem mais pontos que se encontram afastados da reta. Esta análise é corroborada pelo coeficiente de correlação que é mais baixo nos últimos casos.

5.3.2. Análise estatística

A finalidade desta análise não é verificar se há uma boa relação linear entre os dados de energia adquiridos pelos dois sistemas, *MMS* e *MESDAS*, mas avaliar o modelo $y=x$, já que o que se pretendia era a igualdade dos consumos elétricos.

Para tal, recorreu-se à análise estatística de t de *Student*. O valor de t é visto na tabela de distribuição de Student para um nível de confiança de 95% e para $(N-2)$ graus de liberdade, sendo N o nº de observações. Através da função “PROJ.LIN”, disponível na ferramenta Excel, determinou-se o valor do declive, m , da ordenada na origem, b , e as respetivas incertezas. Foi necessário calcular ainda os parâmetros $t(m)$ e $t(b)$, pelas **Equações 5.2 e 5.3**.

$$t(m) = \frac{(m-1)}{\text{incerteza}} \quad \text{(Equação 5.2)}$$

$$t(b) = \frac{(b-0)}{\text{incerteza}} \quad \text{(Equação 5.3)}$$

Estes cálculos são apresentados no **Anexo B.4.2**.

Se $t(m)$ e $t(b)$ forem inferiores ao t de *Student* pode assumir-se que o modelo $y=x$ é aceite com um grau de confiança de 95%. Caso contrário, rejeita-se o modelo.

Na **Tabela 5.2** constam os parâmetros da análise t de *Student* para o modelo $y=x$ e para cada um dos misturadores.

Tabela 5.2 Análise *t* de Student para o modelo $y=x$

Misturador	<i>t</i> de <i>Student</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	Erro <i>m</i>	Erro <i>b</i>	Incerteza <i>m</i>	Incerteza <i>b</i>	<i>t</i> (<i>m</i>)	<i>t</i> (<i>b</i>)	$y=x?$
10	1,963	0,8843	11,21	0,1157	11,21	0,01156	6,436	10,01	1,741	Não
11	1,969	0,9080	-14,76	0,09199	14,76	0,01097	9,388	8,389	1,572	Não
12	1,964	0,9310	11,07	0,06902	11,07	0,01247	10,85	5,536	1,021	Não
6	1,964	0,8145	34,62	0,1855	34,62	0,01311	6,357	14,14	5,446	Não
7	1,964	0,7463	68,82	0,2537	68,82	0,01489	7,328	17,04	9,392	Não

Observando a **Tabela 5.2**, pode constatar-se que os erros associados ao declive são baixos, mas sendo as incertezas associadas ao declive muito pequenas, o parâmetro *t*(*m*) toma valores superiores ao valor de *t* de *Student*, o que significa que o modelo $y=x$ deve ser rejeitado.

Por outro lado, os erros associados à ordenada na origem são mais significativos, mas sendo as incertezas associadas à ordenada na origem maiores, o parâmetro *t*(*b*) toma valores inferiores ao *t* de *Student* nos casos dos misturadores 10, 11 e 12. Mesmo assim, não se pode aceitar o modelo $y=x$ com 95% de confiança por causa do parâmetro *t*(*m*).

Comparando com os restantes, os misturadores 6 e 7 obtiveram os piores resultados, no sentido em que se afastam mais do modelo $y=x$. É sabido que os *drives* dos motores dos misturadores 6 e 7 já se encontram obsoletos, o que pode explicar o facto de se terem obtido desvios maiores nestes casos. Já os *drives* dos motores dos misturadores 10, 11 e 12 foram substituídos recentemente e, portanto, já se esperava que ao cálculo da energia consumida estivesse associado um erro menor.

Esta análise estatística permitiu confirmar que efetivamente o valor da energia não é igual nos dois sistemas. Os desvios face ao modelo de igualdade não implicam que os valores reais não sejam iguais, nem implicam que o MMS esteja a fornecer um valor errado. Já se sabia que os desvios eram inevitáveis, consequência de todas as diferenças que existem entre programas, e de se estar a tentar comparar valores que são calculados e comunicados por sistemas completamente diferentes.

Em suma, desta análise estatística conclui-se que não é possível validar o modelo $MMS \text{ (kWh)} = MESSDAS \text{ (kWh)}$, ou seja, os valores de energia consumida pelos motores dos misturadores, adquiridos pelos dois sistemas, não são iguais. Realmente, apesar do tratamento exaustivo dos dados adquiridos, parece não ser possível eliminar todas as variáveis que diferenciam o *MMS* do *MESSDAS*, nomeadamente o desfasamento temporal e ainda o facto do registo da energia ser contínuo no *MESSDAS* e no *MMS* ocorrer apenas durante o tempo de carga. Toda a análise foi feita no sentido de reduzir ao mínimo estes fatores para se poder validar o sistema *MMS*.

No entanto, o sistema *MMS* pode ser validado tendo em conta que os pontos obtidos foram de uma forma geral, bem ajustados por correlações lineares, o que pode ser comprovado pelos respetivos coeficientes de correlação.

Os desvios médios obtidos, inferiores a 20%, são aceitáveis sob o ponto de vista do DIP, na medida em que já permitem ter uma noção comparativa dos consumos elétricos entre misturadores.

Toda esta análise falha quando aplicada ao misturador 5. Assim, contrariamente aos outros, não se pode confiar nos dados de energia do *MMS* para este misturador e será necessário proceder a uma calibração do respetivo *PLC*.

6. Consumos Energéticos Específicos no setor de Misturação

Após a validação dos dados de energia adquiridos no MMS para os misturadores 6, 7, 10, 11 e 12, prosseguiu-se com a realização do 2º objetivo do trabalho: caracterizar os consumos específicos nestes misturadores.

6.1. Caracterização por misturador

À base de dados criada anteriormente, que reúne os dados de energia com os dados de produção, relativos ao período de maio de 2022 a março de 2023, adicionaram-se os dados até 21 de maio de 2023. Depois, calcularam-se os consumos energéticos específicos – CEE para cada uma das cargas de cada composto, utilizando a **Equação 6.1**.

$$CEE = \frac{\text{Energia elétrica (motores) consumida durante a carga (kWh)}}{\text{Massa carga (toneladas)}} \quad (\text{Equação 6.1})$$

Através da média dos CEE de todas as cargas feitas num determinado misturador, obtém-se a energia elétrica que o respetivo motor consome, em média, na produção de 1 tonelada de composto. A **Figura 6.1** mostra o CEE médio e a produção total para cada misturador para o período de 1 de janeiro a 21 de maio de 2023.

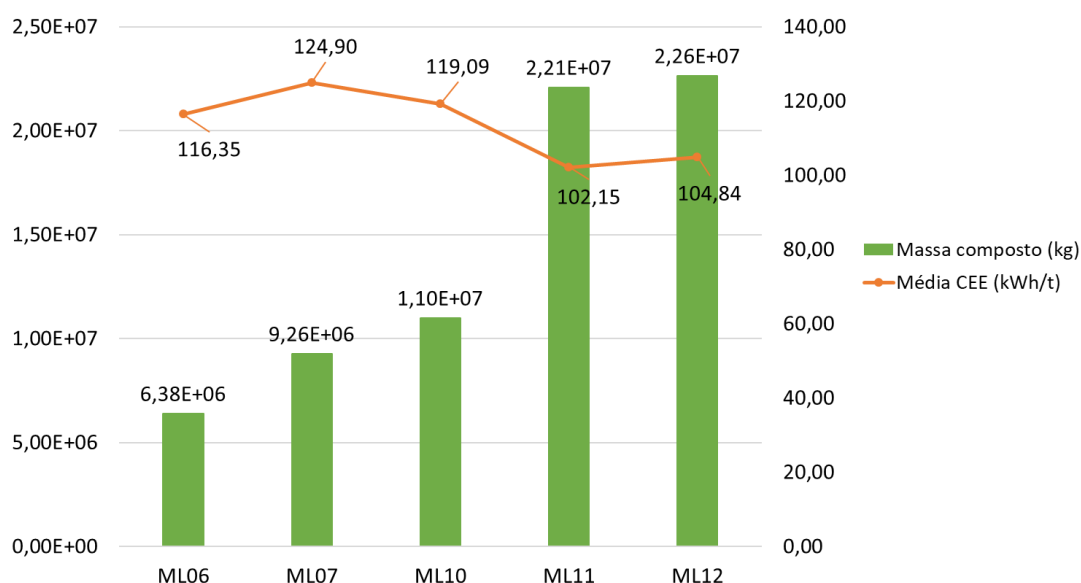


Figura 6.1 CEE médio e produção total para cada misturador em 2023

Os dados do gráfico encontram-se em forma de tabela no **Anexo C.1**.

A partir da **Figura 6.1** pode constatar-se que o CEE médio difere de máquina para máquina, sendo que os misturadores 11 e 12 apresentam os menores valores. Assim, pode concluir-se que estes são os mais eficientes sob o ponto de vista energético.

A produção total de composto varia bastante de misturador para misturador. Os *big tandem* produzem mais do que o dobro da quantidade produzida pelos restantes, por isso, apesar de serem os mais eficientes são também os que consomem mais energia.

6.2. Caracterização por composto

De seguida, elaborou-se uma tabela dinâmica que determina para cada composto o CEE médio e a produção, em percentagem, em cada misturador. Esta tabela foi construída a partir da base de dados anteriormente referida.

A **Tabela 6.1** mostra os resultados obtidos para os 10 compostos mais produzidos, considerando apenas o período de 1 de janeiro a 21 de maio de 2023.

O **Anexo C.2** apresenta estes resultados para os restantes compostos produzidos em mais do que um misturador no mesmo período.

Tabela 6.1 CEE médio e distribuição da produção por misturador dos 10 compostos mais produzidos em 2023

Composto	ML06		ML07		ML10		ML11		ML12	
	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod
FMO-H06996YWM							78,34	100%		
FMO-S00211WL		0,00%		0,00%		0,00%	91,42	3,22%	90,83	96,8%
M1-B00458		0,00%		0,00%		0,00%	104,02	62,8%	106,21	37,2%
R1-R00218-A	94,00	35,1%	96,95	50,1%	112,86	14,5%	107,58	0,0376%	129,22	0,301%
M1-T01139-A		0,00%	115,23	0,669%		0,00%		0,00%	125,06	99,3%
M3-B00460		0,00%		0,00%		0,00%	80,30	1,01%	77,22	99,0%
M1-B00460		0,00%		0,00%		0,00%	120,30	7,36%	122,21	92,6%
R1-T01139-A	86,99	4,48%		0,00%	114,48	16,3%	107,26	10,8%	106,46	68,4%
M1-B00163		0,00%		0,00%		0,00%	116,27	59,2%	109,45	40,8%
M1-T17771		0,00%		0,00%	153,33	6,93%	134,81	93,1%		0,00%

A gradação de cores na **Tabela 6.1** pretende organizar os valores de CEE médio dos misturadores desde o valor mais baixo (tons de verde) até ao valor mais alto (tons de laranja).

De uma primeira análise é perceptível que o mesmo composto apresenta diferentes CEE em diferentes misturadores, sendo que estas diferenças são mais significativas entre misturadores de famílias diferentes.

6.3. Alocação da produção de acordo com o CEE

Para cada um dos compostos, determinou-se o CEE atual do composto a partir da **Equação 6.2**, que corresponde à média ponderada dos misturadores, i , que produzem esse composto.

$$CEE_{atual} = \sum \left(CEE_{médio_i} * \frac{\%Prod_i}{100} \right) \quad (\text{Equação 6.2})$$

De seguida, determinou-se o CEE novo, que corresponde à alocação da produção total do composto a um só misturador, que apresente o CEE mais baixo para esse composto. Esta alocação é representativa da maior poupança energética possível. Pela **Equação 6.3** calculou-se a poupança energética resultante da nova alocação.

$$Poupança \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right)_{\text{composto}} = (CEE_{atual} - CEE_{novo}) * Produção\ anual * \\ Preço\ energia \left(\frac{\text{€}}{\text{kwh}} \right) \quad (\text{Equação 6.3})$$

Esta análise foi realizada para o período de 1 de janeiro a 21 de maio de 2023, tendo sido apenas considerados os compostos que tiveram produção neste período e em mais do que um misturador: **54 compostos analisados**.

Na **Tabela 6.2** constam o CEE atual, a nova alocação, bem como o CEE novo e a poupança anual resultantes da proposta. Apenas os melhores resultados são apresentados, dispostos por ordem decrescente de poupança anual.

No **Anexo C.3** encontram-se os exemplos de cálculo dos CEE atual e novo e da poupança anual, bem como os resultados para os restantes compostos.

Tabela 6.2 CEE atual, proposta de alocação e resultados de CEE e poupança anual

Composto	CEE atual (kWh/t)	Alocação	CEE novo (kWh/t)	Produção anual (t)	Poupança anual (kWh)	Poupança anual (€)
R1-R00218-A	98,32	ML06	94,00	14436,80	62384,21	9 357,63
M1-T01139-A	125,00	ML07	115,23	3768,49	36788,97	5 518,35
M1-B00163	113,49	ML12	109,45	5608,78	22646,20	3 396,93
M1-T01102	145,44	ML12	124,03	907,23	19420,32	2 913,05
M1-T17513	193,67	ML07	186,48	2677,91	19237,79	2 885,67
R1-T16734	96,01	ML07	76,62	931,65	18068,27	2 710,24
M1-T13127	143,94	ML11	135,35	1677,48	14407,03	2 161,05
M1-T33025	158,71	ML11	150,00	1542,55	13439,96	2 015,99
MA-B02516	128,20	ML06	102,08	509,53	13309,68	1 996,45
M1-B00458	104,84	ML11	104,02	16159,24	13139,91	1 970,99
M1-T15577	145,63	ML11	132,54	999,40	13075,15	1 961,27
M1-T02022	162,77	ML06	154,34	1384,94	11669,75	1 750,46
M1-T17817	147,43	ML06	138,73	1163,96	10127,18	1 519,08
M1-B00460	122,07	ML11	120,30	5373,30	9467,65	1 420,15
WO-H06996YM	47,01	ML12	41,14	1497,06	8792,37	1 318,86
M1-T09170	143,38	ML06	138,88	1744,98	7850,37	1 177,56
R1-T02022	80,04	ML06	72,39	953,92	7298,93	1 094,84
Total	-	-	-	61337,22	301123,75	45 168,56

No total, estimou-se uma redução do consumo elétrico anual de 301 123,75 kWh, o que se traduz na poupança de 45 168,56 € por ano.

A distribuição dos compostos pelos misturadores tem que ver com a disponibilidade das matérias-primas e com as características do próprio misturador e da respetiva linha de misturação que podem ou não ser adequadas à produção de um determinado composto. Quando um composto pode ser produzido em vários misturadores, o planeamento da produção segue o *mcm – most commun method* – que se baseia em três grandes fatores: produtividade, processabilidade e qualidade. A eficiência energética não é um fator tido em conta por este método.

Por isso, apesar dos resultados serem bastante atrativos, a alocação dos compostos a um misturador baseada exclusivamente no critério de consumo energético pode não ser viável.

A título de exemplo, de acordo com o *mcm*, os compostos M1-T01139A e M1-B00460 são produzidos maioritariamente no ML12. A nova alocação propõe que estes passem a ser produzidos totalmente no ML07 e no ML11, respetivamente. Esta transição é vantajosa ao nível do consumo energético, mas pode não beneficiar os outros fatores.

Além disso, em alguns compostos o consumo de energia pode ser reduzido através da otimização do ciclo de mistura, não sendo necessária uma nova alocação.

Por estas razões, optou-se por uma abordagem diferente, que será desenvolvida no subcapítulo que se segue.

6.4. Oportunidades de melhoria

Neste subcapítulo são analisados alguns exemplos de compostos que apresentam variações significativas de CEE entre misturadores da mesma família e entre misturadores de famílias diferentes. A finalidade desta análise é encontrar oportunidades de melhoria adequadas para cada caso.

Mais uma vez, os dados utilizados neste estudo são relativos ao período de 1 de janeiro a 21 de maio de 2023.

Importa salientar que o rendimento do motor é igual em todos os misturadores, pelo que as diferenças de consumo energético não estão associadas a este fator.

As principais especificações técnicas dos misturadores, tais como o rendimento do motor, são apresentadas no **Anexo C.4**.

6.4.1. Misturadores da mesma família

À partida, em misturadores iguais, espera-se que o consumo energético associado à produção do mesmo composto seja igual, porque os ciclos de mistura são semelhantes e as características técnicas dos misturadores são as mesmas.

No **Anexo C.5** encontram-se os dados de consumo elétrico e de produção referentes aos compostos em análise.

- Misturadores *single* – ML06 e ML07

Selecionou-se um composto – M1-T17817 – produzido nos misturadores 6, 7 e 10. A distribuição da produção pelos misturadores e o respetivo CEE médio apresentam-se na **Figura 6.2**.

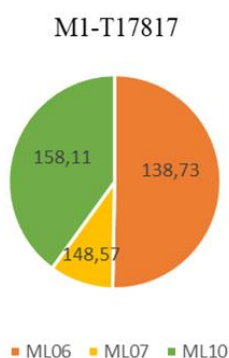


Figura 6.2 M1-T17817: CEE médio (kWh/t) e distribuição da produção em 2023

Repare-se que o CEE médio do M1-T17817 é mais baixo no ML06 – 138,73 kWh/t – do que no ML07 – 148,57 kWh/t.

As diferenças verificadas não são muito significativas e são explicadas por ligeiras diferenças nos ciclos de mistura.

O ciclo de mistura deste composto define valores de *setpoint* para a temperatura da água de recirculação das TCU's inferiores no ML07. Assim, o motor do ML07 tem de consumir mais energia para aumentar a velocidade dos rotores e, deste modo, fornecer a energia necessária ao composto para que a sua temperatura aumente até ao valor pretendido.

- Misturadores *big tandem* – ML11 e ML12

A título exemplificativo, são apresentados dois compostos: M1-B00163 e M1-B00458. Ambos são produzidos nos misturadores 11 e 12. A **Figura 6.3** apresenta a distribuição da produção pelos misturadores e o respetivo CEE médio.

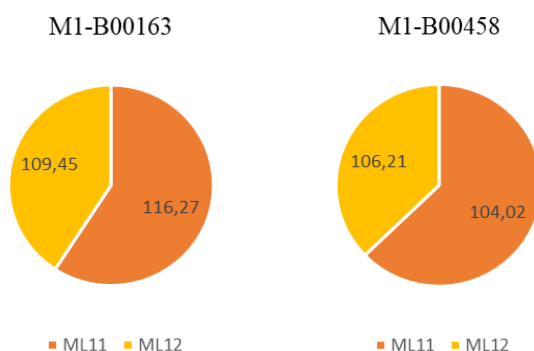


Figura 6.3 M1-B00163 e M1-B00458: CEE médio (kWh/t) e distribuição da produção em 2023

Note-se que o CEE médio do M1-B00163 é mais baixo no ML12 – 109,45 kWh/t – do que no ML11 – 116,27 kWh/t. Contrariamente, o M1-B00458 apresenta um CEE médio inferior no ML11 – 104,02 kWh/t – do que no ML12 – 106,21 kWh/t.

O ciclo de mistura do M1-B00163 mostra que a temperatura do composto na câmara inferior do ML11 é superior. No ML11 a temperatura foi aumentada para reduzir a viscosidade do composto, mas esta alteração não foi replicada para o ML12. Para estabilizar uma temperatura mais elevada, este motor tem de manter um número de rotações mais elevado, o que implica um maior consumo de energia elétrica.

Por outro lado, o ciclo de mistura do M1-B00458 mostra que o fator de enchimento é superior no ML12. Quando a câmara de mistura está mais cheia, o trabalho exigido ao motor para mover e misturar o volume de material é maior, por isso o consumo de energia tende também a ser maior.

Desta análise pode concluir-se que as diferenças de CEE não estão associadas ao misturador em si, mas sim ao processo. Nestes casos, a alocação da produção do composto ao misturador que permite o menor CEE não é a melhoria mais indicada.

Propõe-se, então, que em misturadores do mesmo tipo, os ciclos de mistura sejam estudados e otimizados no sentido de minimizar o consumo elétrico dos motores, sem comprometer a qualidade de mistura.

6.4.2. Misturadores de famílias diferentes

Neste caso, prevê-se que o consumo energético associado à produção do mesmo composto seja diferente, uma vez que as características técnicas dos misturadores são distintas e os ciclos de mistura são adaptados ao tipo de misturador.

No **Anexo C.5** encontram-se os dados de consumo elétrico e de produção referentes aos compostos em análise.

- *Tandem vs Big Tandem* (ML10 e ML11)

Analísaram-se dois compostos que são produzidos nos misturadores 10 e 11: M1-T13127 e M1-T33025. O CEE médio e a distribuição da produção destes compostos encontram-se na **Figura 6.4**.

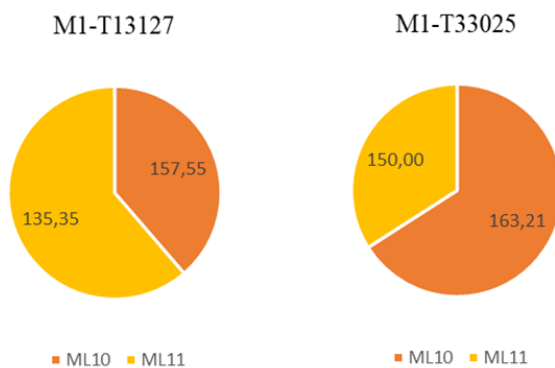


Figura 6.4 M1-T13127 e M1-T33025: CEE médio (kWh/t) e distribuição da produção em 2023

Observe-se que o CEE médio do M1-T13127 é 135,35 kWh/t no ML11 e 157,55 kWh/t no ML10. Quanto ao M1-T33025, o CEE médio é 150,00 kWh/t no ML11 e 163,21 kWh/t no ML10. A mistura dos compostos é mais eficiente energeticamente se ocorrer no misturador 11, em ambos os casos.

Pelo ciclo de mistura do M1-T13127, constata-se que o fator de enchimento é maior no misturador 11. Para misturar cargas que ocupam um maior volume do misturador, o motor necessita de consumir mais energia. Por esta razão, o consumo elétrico dos motores do ML11 é superior.

Por outro lado, a massa média das cargas do M1-T13127 é 250,72 kg no ML10 e 462,79 kg no ML11. Assim, ao normalizar a energia consumida pela massa de composto, obtém-se que o ML11 consome menos energia por tonelada de composto do que o ML10.

Pelo ciclo de mistura do M1-T33025, verifica-se que o tempo de ciclo é inferior no misturador 11. Para que o composto atinja a temperatura pretendida em menos tempo, o motor necessita de consumir mais energia elétrica.

A massa média das cargas do M1-T33025 é 250,76 kg no ML10 e 435,70 kg no ML11. Normalizando a energia consumida pela massa de composto, obtém-se, mais uma vez, que o ML11 consome menos energia por tonelada de composto do que o ML10.

Conclui-se que o ML10 é menos eficiente do que os *big tandem*, pois apesar de consumir menos, produz menos massa e a proporção consumo de energia/ produção acaba por ser maior. Posto isto, propõe-se que os compostos produzidos nos misturadores 10 e 11, passem a ser produzidos, tanto quanto possível, no misturador 11.

Na **Tabela 6.3** apresentam-se os compostos que podem obter melhores resultados com a implementação desta medida, dispostos por ordem decrescente de poupança anual.

Tabela 6.3 Resultados de poupança anual da alocação ao ML11

Composto	CEE atual (kWh/t)	CEE novo (kWh/t)	Poupança anual (kWh)	Poupança anual (€)
M1-T13127	143,94	135,35	14407,03	2 161,05
M1-T33025	158,71	150,00	13439,96	2 015,99
M1-T15577	145,63	132,54	13075,15	1 961,27
M1-T15921	165,51	158,39	6297,77	944,66
M1-T17771	136,09	134,81	5394,12	809,12
R1-T13127	94,18	88,12	3874,00	581,10
Total			56488,02	8 473,20

Se estes compostos passarem a ser produzidos totalmente no ML11, estima-se que a redução do consumo elétrico anual seja de 56488,02 kWh e a poupança anual seja de 8 473,20 €.

- *Tandem vs Single* (ML10, ML06 e ML07)

Analisaram-se dois compostos: R1-T16734 e MA-B02516. O primeiro é produzido nos misturadores 7 e 10 e o segundo é produzido nos misturadores 6, 7 e 10. Na **Figura 6.5** apresentam-se o CEE médio e a distribuição da produção destes compostos.

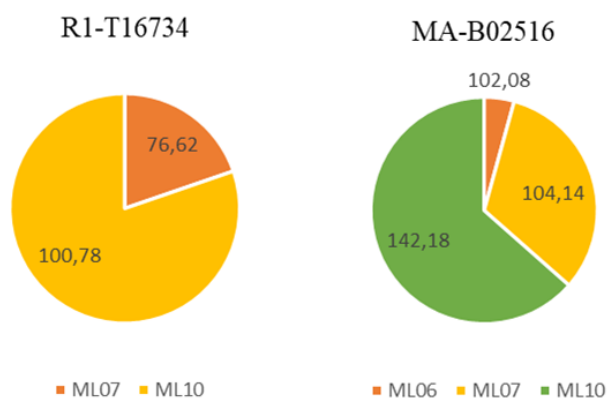


Figura 6.5 R1-T16734 e MA-B02516: CEE médio (kWh/t) e distribuição da produção em 2023

Atente-se que o CEE médio do R1-T16734 é 76,62 kWh/t no ML07 e 100,78 kWh/t no ML10. Quanto ao MA-B02516, o CEE médio é 102,08 kWh/t no ML06, 104,14 kWh/t no ML07 e 142,18 kWh/t no ML10. Nos dois casos, a mistura é mais eficiente sob o ponto de vista energético nos misturadores do tipo *single*.

A principal diferença entre os misturadores 6/7 e 10 é que os primeiros apresentam uma câmara de mistura, enquanto o segundo possui duas. Portanto, as cargas realizadas no ML10 apresentam mais etapas, o que resulta num aumento do tempo de ciclo e, por conseguinte, num aumento do consumo de energia elétrica por parte dos motores.

Em média, a massa da carga do R1-T16734 é 250,78 kg no ML07 e 248,41 kg no ML10 e a do MA-B02516 é 222,37 kg no ML07 e 209,17 kg no ML10.

Dado que o consumo elétrico é superior no ML10 e a massa da carga é idêntica nos misturadores *tandem* e *single*, conclui-se que o consumo específico é inferior nos *single*.

Conclui-se, assim, que o ML10 é menos eficiente do que os *single*, porque produz aproximadamente a mesma massa, porém consome mais, o que resulta numa proporção consumo de energia/ produção maior. Propõe-se, então, que os compostos produzidos nos

misturadores *tandem* e *single*, passem a ser produzidos, tanto quanto possível, nos misturadores *single*.

No entanto, há compostos em que esta alteração não é viável, como é o caso do MA-B02516, que é um composto de *mastication* contrariamente ao R1-T16734, cujo prefixo R1, indica ser um composto de *remill*. Esta operação tem, por finalidade, aumentar a dispersão de todos os ingredientes e/ou reduzir a viscosidade do composto, enquanto a operação de *mastication* permite reduzir o comprimento da cadeia do polímero. Comparativamente com o *remill*, a *mastication* é uma operação que exige maior consumo de energia para que o composto obtido tenha a qualidade desejada. Por esse motivo, o *mcm* define que este composto deva ser produzido, sempre que possível, no ML10. Contrariamente, a qualidade do *remill* não é influenciada pela energia envolvida nos *steps* que ocorrem na câmara inferior do ML10, por isso o R1-T16734 deve ser produzido, tanto quanto possível, no ML07.

Na **Tabela 6.4** constam os resultados relativos ao R1-T16734.

Tabela 6.4 Resultados de poupança anual da alocação ao ML07

Composto	CEE atual (kWh/t)	CEE novo (kWh/t)	Poupança anual (kWh)	Poupança anual (€)
R1-T16734	96,01	76,62	18068,27	2 710,24

A alocação da produção total do R1-T16734 ao ML07, possibilita uma redução do consumo elétrico anual de 18068,27 kWh e uma poupança anual de 2 710,24 €.

- *Single vs Tandem vs Big Tandem*

Para estudar este caso, analisaram-se três compostos de *remill*: R1-R00218-A e R1-T01139-A e R1-T02022. O primeiro é produzido nos misturadores 6, 7, 10, 11 e 12. O segundo é produzido nos misturadores 6, 10, 11 e 12. E, o terceiro é produzido nos misturadores 6, 7, 10 e 11.

A **Figura 6.6** apresenta o CEE médio e a distribuição da produção destes compostos.

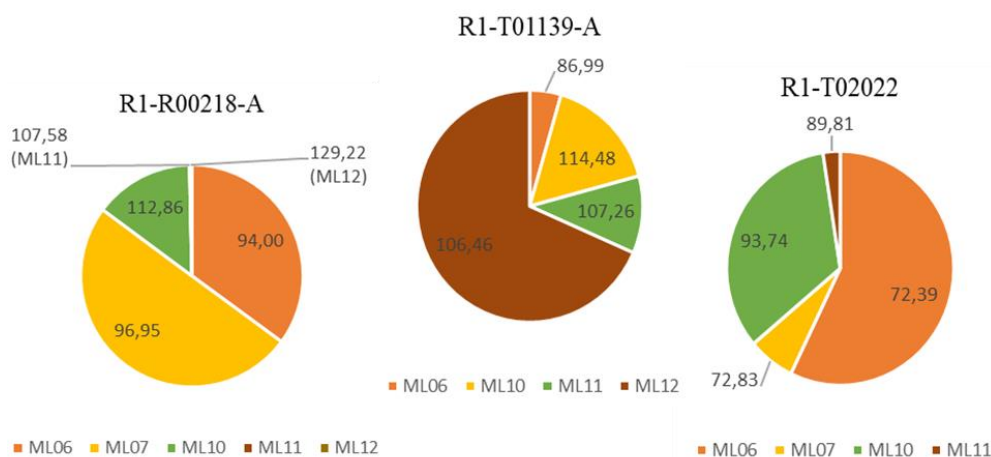


Figura 6.6 R1-R00218-A, R1-T01139-A e R1-T02022: CEE médio (kWh/t) e distribuição da produção em 2023

Repare-se que o CEE médio do R1-R00218-A é inferior nos *single*: 94,00 kWh/t no ML06 e 96,95 kWh/t no ML07. Quanto ao R1-T01139-A, o CEE médio é inferior no ML06: 86,99 kWh/t. Relativamente ao R1-T02022, o CEE médio é mais baixo nos *single*: 72,39 kWh/t no ML06 e 72,83 kWh/t no ML07.

Estes exemplos demonstram, mais uma vez, que os misturadores *single* são mais adequados para fazer *remill*.

Em média, a massa da carga nos *single* é de 237 kg, no *tandem* é de 236 kg e nos *big tandem* é de 398 kg. Porém, o consumo elétrico dos misturadores *single* ronda os 20 kWh por carga de *remill*, o do *tandem* ronda os 25 kWh e o dos *big tandem* ronda os 43 kWh. Assim, apesar dos *single* produzirem menor quantidade, consomem muito menos, obtendo-se uma razão consumo de energia/ produção inferior às dos restantes.

Como já se explicou anteriormente, a quantidade de energia que é consumida a mais nos *tandem* e nos *big tandem* deve-se ao facto de estes apresentarem duas câmaras, o que implica que o composto seja misturado durante mais tempo. O facto de o tempo de ciclo ser maior não beneficia a qualidade do *remill*. Assim, propõe-se que os compostos de *remill* sejam alocados, tanto quanto possível, aos misturadores *single*.

A **Tabela 6.5** mostra os compostos de *remill* passíveis de serem sujeitos à nova alocação.

Tabela 6.5 Resultados de poupança anual da alocação de compostos de remill aos single

Composto	CEE atual (kWh/t)	CEE novo (kWh/t)	Poupança anual (kWh)	Poupança anual (€)
R1-R00218-A	98,32	94,00	62384,21	9 357,63
R1-T02022	80,04	72,39	7298,93	1 094,84
R1-T01139-A	106,98	106,46	1577,14	236,57
Total			71260,28	10 689,04

A implementação desta medida estima uma redução do consumo elétrico anual de 71260,28 kWh e uma poupança anual de 10 689,04 €.

6.4.3. Análise do processo *One Step Mixing (OSM)*

Geralmente, o composto final é produzido em duas etapas: *master*, seguido de final. No entanto, é possível produzir o composto final numa só etapa, recorrendo ao processo OSM. Este ocorre num misturador de duas câmaras (*tandem* ou *big tandem*), no qual o *master* é produzido na câmara superior e o final na câmara inferior.

Sob o ponto de vista de produtividade e de consumo energético, o processo OSM é mais vantajoso. Porém, este processo acarreta problemas ao nível da processabilidade e qualidade em alguns compostos.

Com o objetivo de demonstrar que este processo apresenta um elevado potencial de poupança energética estudou-se o composto T18191 que já foi produzido quer por *master* – M1-T18191 – seguido de final – FMF-T18191 – quer por OSM – FMO-T18191.

Na **Tabela 6.6** apresenta-se o consumo específico médio destes compostos, bem como a poupança anual associada à alteração do processo para OSM. No **Anexo C.6** está patente o exemplo de cálculo da poupança anual.

Tabela 6.6 T18191: CEE médio (kWh/t) e resultados da poupança anual da implementação do OSM

Composto	CEE médio (kWh/t)	Produção anual (t)	Poupança anual (kWh)	Poupança anual (€)
M1-T18191	128,61	426,26	49171,41	7 375,71
FMF-T18191	65,48	687,98		
FMO-T18191	149,96	9,01		

Tal como se pode ver, o CEE total associado ao processo de duas etapas, 194,09 kWh/t, é superior ao CEE associado ao processo de uma etapa, 149,96 kWh/t.

A produção do FMO-T18191 foi testada durante um curto período de tempo, tendo sido produzidas apenas 9,01 toneladas. Dado que os resultados não foram satisfatórios, a produção deste composto foi descontinuada. Se, por hipótese, a produção deste composto tivesse substituído a produção dos compostos M1-T18191 e FMF-T18191, ter-se-iam poupado 7 375,71 €, no período de maio de 2022 a maio de 2023.

Um exemplo bem-sucedido de um composto idêntico a este é o FMO-T16108. Este composto apresenta um CEE médio de 156,04 kWh/t. Além deste, são produzidos vários outros compostos FMO, havendo até alguns que se encontram entre os mais produzidos. No ano de 2023, os FMO representam 22,2% da produção total de compostos, pelo que este processo já permite uma redução do consumo energético muito significativa, mas ainda pode alcançar resultados mais notáveis.

Dado que para já não é viável utilizar o *OSM* em grande parte dos compostos, como é o caso do T18191, pelas razões referidas anteriormente, propõe-se que o processo seja estudado e otimizado para que em breve possa ser amplamente implementado.

7. Conclusões

A presente dissertação dividiu-se em dois grandes objetivos, tendo sido o primeiro a validação dos dados de energia adquiridos no sistema de monitorização dos parâmetros de mistura, *MMS*, e o segundo a caracterização dos consumos específicos no setor de mistura, que terminou com a proposta de algumas medidas de otimização energética.

Para a validação dos dados recorreu-se ao sistema de gestão de energia utilizado pela Continental Mabor, *MESSDAS*. Começou-se pela recolha e tratamento dos dados de consumo elétrico dos motores dos misturadores, no período de 1 de maio de 2022 a 31 de março de 2023. Posteriormente, desenvolveu-se um método que permitiu comparar os valores de energia entre os dois *softwares* em períodos de 1 hora. Por último, procedeu-se à análise dos dados através de gráficos de dispersão de pontos, do modelo de regressão linear e do teste estatístico de *t* de *Student*.

Pela análise das correlações obtidas concluiu-se que o ajuste linear é satisfatório nos misturadores 6, 7, 10, 11 e 12. Por sua vez, os dados relativos ao misturador 5 apresentam um desvio relativo médio de 272,37%. Por isso, este não foi tido em conta no restante desenvolvimento do trabalho. Quanto à análise estatística, esta confirmou que o modelo de igualdade entre os valores de energia dos dois sistemas não pode ser admitido. Apesar disso, os desvios médios obtidos inferiores a 20% possibilitaram a validação dos dados do *MMS*.

Para caracterizar os consumos específicos foram criadas tabelas dinâmicas a partir da mesma base de dados, à qual se adicionaram mais dados até 21 de maio de 2023. Esta ferramenta do Excel permitiu calcular o consumo específico médio em cada misturador e concluir que os misturadores 11 e 12 são os mais eficientes. Permitiu também calcular o consumo específico médio de cada composto em cada misturador, tendo se concluído que o mesmo composto gera diferentes consumos de energia em diferentes misturadores.

De seguida, com base na análise dos resultados de 2023, tentaram-se encontrar algumas oportunidades de melhoria. Inicialmente, propôs-se a alocação dos compostos a um único misturador, tendo como único critério o consumo específico. O resultado obtido

traduz-se numa poupança anual de 45 168,56 €. No entanto, esta proposta pode não ser viável ao nível da qualidade e processabilidade dos compostos.

Por esta razão, fez-se um estudo mais focado em alguns compostos que apresentam diferenças significativas de consumo específico em diferentes misturadores, com vista a encontrar melhorias adequadas para cada caso. Assim, para misturadores do mesmo tipo, concluiu-se que a alocação dos compostos ao misturador com menor CEE não é a melhor alternativa, propondo-se antes a otimização dos seus ciclos de mistura. Relativamente aos misturadores 10 e 11, propõe-se que os compostos sejam produzidos, tanto quanto possível, no misturador 11. Com a implementação desta proposta, estima-se uma poupança anual de 8 473,20 €. Quanto aos misturadores *single* e *tandem*, propõe-se que os compostos sejam produzidos, tanto quanto possível, nos misturadores *single*, desde que esta alocação não comprometa a qualidade do composto. Esta proposta resulta numa poupança anual de 2 710,24 €. O último caso estudado foi o da produção de compostos *remill* nos três tipos de misturador, do qual se concluiu que estes devem ser alocados, tanto quanto possível, aos misturadores *single*. Esta melhoria oferece uma poupança anual de 10 689,04 €.

Por último, analisou-se a produção do composto T18191 em 2 etapas e em *One Step Mixing*. Demonstrou-se que se o processo *OSM* tivesse sido utilizado no último ano, ter-se-iam poupado 7 375,71 €. Visto que o *OSM* ainda não é viável para produzir este e outros compostos, propõe-se que o processo seja otimizado para que futuramente possa ser implementado.

A realização deste trabalho permitiu que fosse criada no Excel uma ferramenta de cálculo e análise dos consumos específicos dos compostos produzidos nos misturadores 6, 7, 10, 11 e 12. Esta ferramenta estará em constante atualização e irá ficar disponível para utilização por parte das direções do processo e do produto, possibilitando, assim, a monitorização regular dos consumos específicos por misturador e por composto, bem como a implementação de medidas de eficiência energética a curto prazo.

8. Sugestões para Trabalhos Futuros

No decorrer do trabalho foram detetados alguns problemas no sistema *MMS*. Um deles é o facto de o *software* não apresentar dados de energia para os misturadores 0, 1, 2, 3 e 4. Sugere-se, assim, que se faça uma revisão aos *main drives* destes motores e sua substituição, caso necessário, para que seja possível determinar os consumos específicos para todos os compostos em todos os misturadores. Além disso, tal como já foi referido na **secção 5.3**, o *PLC* do *main drive* do motor do misturador 5 necessita de uma calibração.

Em projetos futuros, sugere-se que as propostas de melhoria apresentadas por este trabalho sejam testadas e que se estudem outras oportunidades de otimização energética recorrendo à ferramenta implementada.

Referências bibliográficas

- [1] “Grupo Continental - Factos e Números,” [Online]. Available: <https://www.continental-pneus.pt/ligeiros/empresa/sobre-n%C3%B3s/corporativo>. [Acedido em 26 setembro de 2022].
- [2] “Continental Annual Report 2021,” [Online]. Available: Versão PDF do documento descarregada em 28 de setembro de 2022.
- [3] “Quem Somos,” Continental Mabor, [Online]. Available: <https://www.continentalmabor.pt/#QuemSomos>. [Acedido em 7 outubro 2022].
- [4] “Continental já produziu 350 milhões de pneus na fábrica de Famalicão em 30 anos,” Eco Sapo, 2 julho 2020. [Online]. Available: <https://eco.sapo.pt/2020/07/02/continental-ja-produziu-350-milhoes-de-pneus-na-fabrica-de-famalicao-em-30-anos/>. [Acedido em 12 outubro 2022].
- [5] “Continental passa de prejuízo a lucro de €1,5 mil milhões em 2021,” Expresso, 9 março 2022. [Online]. Available: <https://expresso.pt/economia/2022-03-09-continental-passa-de-prejuizo-a-lucro-de-15-mil-milhoes-em-2021>. [Acedido em 12 outubro 2022].
- [6] “Continental Mabor presente na Hannover Messe 2022,” Revista dos Pneus, 5 junho 2022. [Online]. Available: <https://revistadospneus.com/pt/2022/06/05/continental-mabor-presente-na-hannover-messe-2022/>. [Acedido em 12 outubro 2022].
- [7] “Continental Mabor comemora o 30º aniversário,” Revista dos Pneus, 8 julho 2020. [Online]. Available:

<https://revistadospneus.com/pt/2020/07/08/continental-mabor-comemora-o-30o-aniversario/>. [Acedido em 12 outubro 2022].

- [8] “Noções básicas de pneus para veículos de passageiros,” *ContiAcademy*, 30 novembro 2018.
- [9] “Materiais que constituem os pneus,” *Direção Industrialização do Produto - Lousado*, 18 dezembro 2018.
- [10] “Como se produz um pneu,” Continental, [Online]. Available: <https://www.continental-pneus.pt/ligeiros/conhecimento-pt/fundamentos-dos-pneus/producao-de-pneus>. [Acedido em 10 novembro 2022].
- [11] N. Guedes, “Otimização Energética de Equipamentos Produtivos no Setor de Misturação,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- [12] D. Tavares, “Oportunidades Energéticas na Continental Mabor,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [13] M. Sottomayor, “Aumento da Eficiência Energética no setor de Mistura,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2019.
- [14] T. Costa, “Melhoria de Processo na Indústria de Pneus,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- [15] A. Gonçalves, “Análise e Melhoria do Processo de Pintura e Vulcanização na Continental,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.

- [16] “Elements, compounds and mixtures,” BBC, [Online]. Available: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/topics/zstp34j/articles/zngddp3>. [Acedido em 16 novembro 2022].
- [17] A. Limper, *Mixing of Rubber Compounds*, Munique: HANSER, 2012.
- [18] J. Funt, *Mixing of Rubber*, Reino Unido: Smithers, 1977.
- [19] S. Wachter, “Optimising the continuous final mixing of rubber compounds,” Technological University Dublin, 2014.
- [20] M. Caetano, “Mistura,” CTB, [Online]. Available: <https://www.ctborracha.com/processos/mistura/>. [Acedido em 16 novembro 2022].
- [21] M. Caetano, “Misturadores Internos,” CTB, [Online]. Available: <https://www.ctborracha.com/processos/mistura/tipos-de-misturadores/misturadores-internos/>. [Acedido em 16 novembro 2022].
- [22] “Rotor Technology,” KOBELCO, [Online]. Available: <https://kimi.co.in/rotor-technology/>. [Acedido em 16 novembro 2022].
- [23] T. Moribe, “Advanced Intermeshing Mixers for Energy Saving and Reduction of Environmental Impact,” Mitsubishi Heavy Industries Technical Review , 2012.
- [24] D. R. Feierabend, “Basics of Mixing,” *ContiUniversity*, 3 abril 2018.

- [25] “Tandem mixers,” HF Mixing Group, [Online]. Available: <https://www.hf-mixinggroup.com/en/products/mixers/tandem-mixer/>. [Acedido em 7 dezembro 2022].
- [26] “CONVEX™ SERIES,” HF Mixing Group, [Online]. Available: <https://www.hf-mixinggroup.com/en/products/downstream-equipment/convex-series/>. [Acedido em 7 dezembro 2022].
- [27] “MILLMIX® – SHEETING AND MIXING MILL,” HF Mixing Group, [Online]. Available: <https://www.hf-mixinggroup.com/en/products/downstream-equipment/millmix/>. [Acedido em 7 dezembro 2022].
- [28] “Rubber Machinery,” Flame Machinery, [Online]. Available: <http://www.chinaflame.net/ProShow.Asp?ID=468>. [Acedido em 9 dezembro 2022].
- [29] P. Warriar, “There Is Lot of Innovation In The Rubber Machinery,” Rubber Machinery World, 5 junho 2015. [Online]. Available: <https://rubbermachineryworld.com/2015/06/05/there-is-lot-of-innovation-in-the-rubber-machinery-prof-dr-andreas-limper/>. [Acedido em 14 dezembro 2022].

Anexos

Anexo A – Consumo elétrico do setor de misturação

Neste anexo apresentam-se todos os dados relativos ao consumo elétrico do setor de misturação obtidos a partir do *MESSDAS*.

Na **Tabela A.1** apresenta-se o consumo elétrico da fábrica, o consumo elétrico do setor de misturação e a percentagem que este setor representa no consumo elétrico total.

Tabela A.1 Consumo elétrico total e do setor de misturação e percentagem que este setor representa na fatura elétrica da Continental Mabor desde fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023

Mês/ano	Consumo total fábrica (kWh)	Consumo setor misturação (kWh)	Misturação
fev/22	1,50E+07	6,49E+06	43,2%
mar/22	1,63E+07	6,92E+06	42,5%
abr/22	1,49E+07	8,18E+06	54,9%
mai/22	1,73E+07	7,44E+06	43,1%
jun/22	1,63E+07	6,95E+06	42,6%
jul/22	1,75E+07	7,41E+06	42,4%
ago/22	1,07E+07	4,04E+06	37,9%
set/22	1,66E+07	6,99E+06	42,2%
out/22	1,68E+07	7,13E+06	42,3%
nov/22	1,59E+07	6,68E+06	42,0%
dez/22	1,10E+07	4,51E+06	41,1%
jan/23	1,60E+07	6,65E+06	41,5%
fev/23	1,53E+07	6,58E+06	42,9%

Na **Tabela A.2** encontra-se o consumo de energia elétrica por linha de misturação desde janeiro de 2022 a fevereiro de 2023.

Tabela A.2 Consumo elétrico das linhas de misturação desde janeiro de 2022 a fevereiro de 2023

	Linha #0	Linha #1	Linha #2	Linha #3	Linha #4	Linha #5	Linha #6	Linha #7	Linha #9	Linha #10	Linha #11	Linha #12
jan/22	3,72E+05	2,86E+05	3,64E+05	2,32E+05	4,59E+05	4,42E+05	4,47E+05	4,39E+05	4,01E+05	4,89E+05	6,97E+05	6,89E+05
fev/22	3,70E+05	2,74E+05	3,91E+05	2,18E+05	4,22E+05	4,43E+05	4,53E+05	4,40E+05	4,01E+05	4,96E+05	5,87E+05	7,02E+05
mar/22	3,99E+05	3,00E+05	4,30E+05	2,46E+05	5,11E+05	4,90E+05	2,27E+05	5,00E+05	4,35E+05	5,33E+05	6,59E+05	7,90E+05
abr/22	3,54E+05	2,76E+05	3,66E+05	2,23E+05	4,27E+05	4,58E+05	4,42E+05	4,29E+05	3,84E+05	4,61E+05	6,03E+05	7,14E+05
mai/22	4,09E+05	2,92E+05	4,14E+05	2,48E+05	4,77E+05	5,17E+05	5,29E+05	5,13E+05	4,30E+05	5,26E+05	7,36E+05	8,25E+05
jun/22	3,72E+05	2,94E+05	3,81E+05	2,18E+05	4,54E+05	4,69E+05	4,90E+05	4,81E+05	4,04E+05	5,02E+05	6,49E+05	7,67E+05
jul/22	3,95E+05	3,20E+05	4,03E+05	2,45E+05	5,14E+05	5,23E+05	4,79E+05	5,08E+05	4,36E+05	5,22E+05	6,49E+05	8,13E+05
ago/22	9,82E+03	2,20E+05	3,51E+04	1,79E+05	3,45E+05	1,22E+05	3,16E+05	3,10E+05	7,03E+04	3,51E+05	5,32E+05	4,51E+05
set/22	3,98E+05	3,05E+05	3,99E+05	2,31E+05	5,01E+05	4,98E+05	4,70E+05	4,86E+05	4,32E+05	4,66E+05	6,23E+05	6,83E+05
out/22	4,26E+05	3,09E+05	4,47E+05	2,42E+05	5,78E+05	4,95E+05	4,81E+05	5,09E+05	4,31E+05	4,98E+05	5,39E+05	7,26E+05
nov/22	3,88E+05	2,85E+05	4,22E+05	2,28E+05	4,96E+05	4,69E+05	4,39E+05	4,60E+05	4,03E+05	4,69E+05	5,72E+05	6,89E+05
dez/22	2,68E+05	1,82E+05	2,75E+05	1,50E+05	3,28E+05	3,06E+05	2,56E+05	2,95E+05	2,64E+05	3,37E+05	4,05E+05	4,82E+05
jan/23	4,11E+05	2,90E+05	4,25E+05	2,25E+05	4,28E+05	4,55E+05	4,41E+05	4,37E+05	4,17E+05	4,95E+05	5,88E+05	7,12E+05
fev/23	4,11E+05	2,74E+05	4,41E+05	2,32E+05	4,58E+05	4,49E+05	4,55E+05	4,34E+05	3,98E+05	4,87E+05	5,73E+05	6,89E+05

As **Tabelas A.3 e A.4** mostram o consumo elétrico dos equipamentos que compõem as linhas #10 e #12, respetivamente, bem como a contribuição de cada equipamento no consumo elétrico total da linha.

Tabela A.3 Consumo elétrico dos equipamentos da linha #10 e respetiva representatividade no consumo elétrico total da linha no mês de fevereiro de 2023

	Consumo elétrico (kWh)	Representatividade (%)
Motor Superior	2,56E+05	52,6%
Motor Inferior	6,86E+04	14,1%
Siemens Control	4,76E+04	9,8%
Calandra + Extrusora	4,02E+04	8,3%
Quadro Auxiliares	3,41E+04	7,0%
TCU's	2,60E+04	5,3%
Quadro IBCs	1,39E+04	2,9%
Total	4,87E+05	100,0%

Tabela A.4 Consumo elétrico dos equipamentos da linha #12 e respetiva representatividade no consumo elétrico total da linha no mês de fevereiro de 2023

	Consumo elétrico (kWh)	Representatividade (%)
Motores	5,28E+05	76,6%
Pomini	6,47E+04	9,39%
Quadro Auxiliares	2,80E+04	4,06%
Siemens Control	2,70E+04	3,92%
Unidade Hidráulica	2,28E+04	3,30%
TCU's	9,87E+03	1,43%
Promera	8,78E+03	1,27%
Total	6,89E+05	100,0%

Anexo B – Validação dos dados de energia do MMS

Os dados de energia do MMS foram validados através da comparação com os dados de energia do software de gestão de energia utilizado pela Continental Mabor, o MESSDAS. A comparação foi feita ao nível da energia consumida pelos motores dos misturadores e dividiu-se em quatro etapas: recolha de dados, tratamento de dados, desenvolvimento de um método de comparação e resultados.

Anexo B.1. Recolha de dados

O MMS – Mixing Management System é um sistema de monitorização dos parâmetros do processo de mistura: temperatura, torque e velocidade dos rotores, pressão exercida pelo martelo e energia consumida.

Estes parâmetros são registados na forma de batch curves, representações gráficas por carga de composto, tal como se vê na **Figura B.1**.

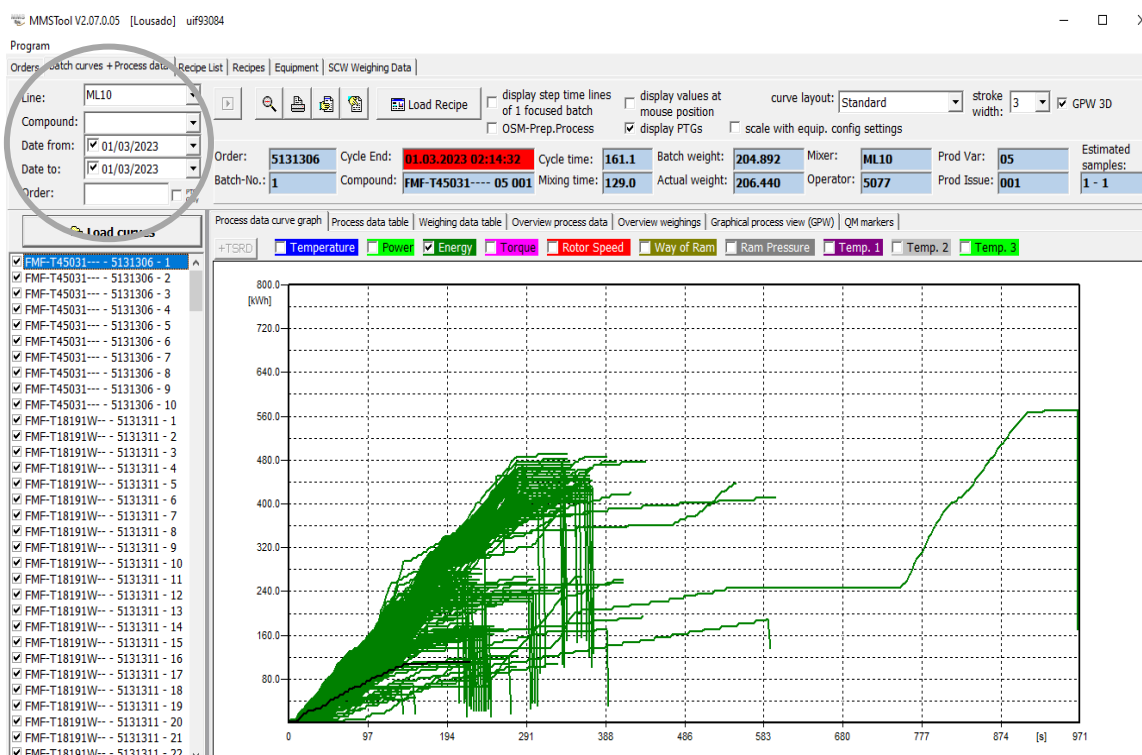


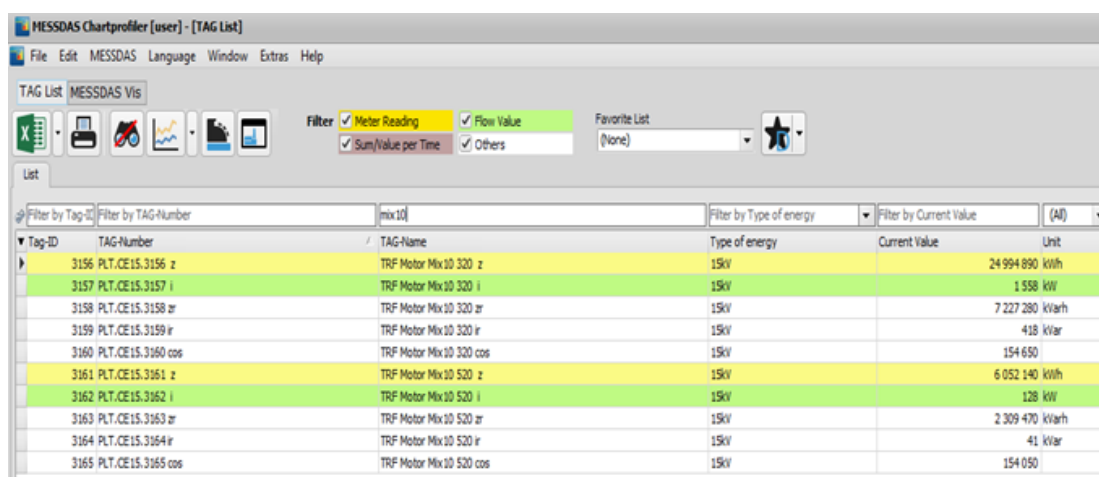
Figura B.1 Batch curves (energia em função do tempo de carga) de 1 de março no misturador 10

No canto superior esquerdo, o *MMS* permite procurar as curvas consoante a linha de misturação, o composto, a data e a ordem. Neste caso, procurou-se pelas cargas do dia 1 de março produzidas na linha #10. Como resultado, surge a lista do lado esquerdo que apresenta o nome do composto, seguido da ordem e do número da carga.

As curvas representadas dizem respeito aos parâmetros seleccionados na barra acima do gráfico. No caso da **Figura B.1**, podem visualizar-se as curvas de energia.

A aquisição dos dados pode ser feita exportando as curvas para um ficheiro Excel, no qual os valores de energia são apresentados de forma cumulativa, em kWh, em função do tempo de carga em segundos. Assim sendo, o valor máximo de cada curva corresponde à energia elétrica consumida pelos motores durante a produção da respetiva carga.

O *MESSDAS* é um sistema de monitorização dos consumos das diversas utilidades (eletricidade, vapor, ar comprimido e água) nos vários equipamentos/setores. Mais uma vez, pretende-se saber o consumo elétrico dos motores do misturador 10. Para tal, acede-se à *TAG List*, lista de todos os consumidores de energia da fábrica, que se encontra na **Figura B.2**.



Tag-ID	TAG-Number	TAG-Name	Type of energy	Current Value	Unit
3156	PLT.CE15.3156 z	TRF Motor Mix10 320 z	15kV	24 994 890	kWh
3157	PLT.CE15.3157 i	TRF Motor Mix10 320 i	15kV	1 558	kWh
3158	PLT.CE15.3158 zr	TRF Motor Mix10 320 zr	15kV	7 227 280	kWh
3159	PLT.CE15.3159 ir	TRF Motor Mix10 320 ir	15kV	418	kWh
3160	PLT.CE15.3160 cos	TRF Motor Mix10 320 cos	15kV	154 650	kWh
3161	PLT.CE15.3161 z	TRF Motor Mix10 520 z	15kV	6 052 140	kWh
3162	PLT.CE15.3162 i	TRF Motor Mix10 520 i	15kV	128	kWh
3163	PLT.CE15.3163 zr	TRF Motor Mix10 520 zr	15kV	2 309 470	kWh
3164	PLT.CE15.3164 ir	TRF Motor Mix10 520 ir	15kV	41	kWh
3165	PLT.CE15.3165 cos	TRF Motor Mix10 520 cos	15kV	154 050	kWh

Figura B.2 Pesquisa do misturador 10 na Tag List

Cada equipamento tem um *TAG ID*, um *TAG Number* e um *TAG Name*. Para facilitar a pesquisa de um equipamento na *TAG List* basta conhecer uma destas informações. Uma *TAG* é uma variável que traduz um parâmetro de um contador. No exemplo apresentado procurou-se por “mix10” na coluna destinada ao *TAG Name*. Dos

resultados encontrados apenas dois, destacados a amarelo, têm unidades de energia, kWh, sendo que o primeiro corresponde ao motor superior e o segundo ao motor inferior.

Na **Tabela B.1** encontram-se as *TAG Number* e *TAG Name* de todos os motores dos misturadores.

Tabela B.1 Lista de TAGs dos motores dos misturadores

	TAG Number	TAG Name
Motor misturador 0	PLT.CE15.1543 z	Misturadora 0 z
Motor misturador 1	PLT.CE15.1335 z	Misturadora 1 z
Motor misturador 2	PLT.CE15.1322 z	Misturadora 2 z
Motor misturador 3	PLT.CE15.1309 z	Misturadora 3 z
Motor misturador 4	PLT.CE15.1296 z	Misturadora 4 z
Motor misturador 5	PLT.CE15.1556 z	Misturadora 5 z
Motor misturador 6	PLT.CE15.1569 z	Misturadora 6 z
Motor misturador 7	PLT.CE15.1582 z	Misturadora 7 z
Motor superior misturador 9	PLT.CE15.1348 z	Misturadora 9 z
Motor inferior misturador 9	PLT.CE15.1361 z	Misturadora 9 z
Motor superior misturador 10	PLT.CE15.3156 z	TRF Motor Mix 10 320 z
Motor inferior misturador 10	PLT.CE15.3161 z	TRF Motor Mix 10 520 z
Motor superior misturador 11	PLT.CE15.3327 z	Mix11 2800kVa z
Motor inferior misturador 11	PLT.CE15.3332 z	Mix11 2800kVa z
Motores misturador 12	PLT.CE15.3317 z	Transformador 10.3 (lado primário) z

Note-se que os misturadores *tandem* tem uma *TAG* para cada motor, à exceção do misturador 12, que apresenta uma só *TAG* para ambos os motores, o que significa que o consumo de energia dos mesmos é contabilizado por um só contador.

Os contadores de energia dos motores dos misturadores organizam-se em ciclos de comunicação, regidos pelo protocolo *M-Bus*. O tempo em que decorre a comunicação entre o concentrador e todos os contadores – tempo de ciclo – pode ser consultado no separador *M-BUS* do *MESSDAS* visível na **Figura B.3**.



Local	Metrologia	Equipamento	IP-Address/COM-Port	Protocolo	Total de Entidades	OK	Em falha	Tempo Ciclo	Status
PT5	CE	TRF 5.1	10.205.46.56 / COM 17	MBUS	20 n	20 n	0 n	44 s	Log
	CE	TRF 6.1	10.205.46.57 / COM 18	MBUS	29 n	29 n	0 n	55 s	Log
PT6	CE	TRF 6.2/QMT	10.205.46.100 / COM 32	MBUS	13 n	13 n	0 n	33 s	Log
	CE	TRF 6.3	10.205.46.103 / COM 33	MBUS	26 n	26 n	0 n	59 s	Log
PT7	CE	TRF 7.3	10.205.46.199 / COM 39	MBUS	18 n	17 n	1 n	33 s	Log
	CE	TRF 7.4	10.205.46.200 / COM 40	MBUS	18 n	18 n	0 n	28 s	Log
PT9	CE	TRF 9.1/TRF 9.2	10.205.46.66 / COM 22	MBUS	26 n	25 n	1 n	71 s	Log
	CE	TRF 10.1	10.205.46.167 / COM 26	MBUS	22 n	22 n	0 n	43 s	Log
PT10	CE	TRF 10.2	10.205.46.168 / COM 27	MBUS	23 n	23 n	0 n	41 s	Log
	CE	QMT	10.205.46.169 / COM 28	MBUS	14 n	13 n	1 n	29 s	Log
	CE	TRF 11.1	10.205.46.182 / COM 37	MBUS	22 n	22 n	0 n	39 s	Log
PT11	CE	TRF 11.2	10.205.46.179 / COM 38	MBUS	20 n	20 n	0 n	39 s	Log

Figura B.3 Dados acerca dos protocolos de comunicação no MESDAS

O quadro de média tensão (QMT) do posto de transformação 10 (PT10), destacado a amarelo, tem 14 contadores, incluindo os contadores de energia dos motores dos misturadores 10, 11 e 12, sendo que 1 está a falhar. O tempo deste ciclo de comunicação é de 29 segundos.

Mais tarde, veio a descobrir-se que o contador em falha corresponde ao motor inferior do misturador 11 e este encontra-se avariado desde 25 de agosto de 2022. Por esse motivo, só foram tidos em conta na comparação os dados até esta data.

O MESDAS permite ainda a visualização gráfica de uma ou mais TAGs. A **Figura B.4** mostra os consumos elétricos dos motores do misturador 10, no mês de março, em períodos de 15 minutos, sendo as barras pretas representativas do motor superior e as barras verdes representativas do motor inferior.

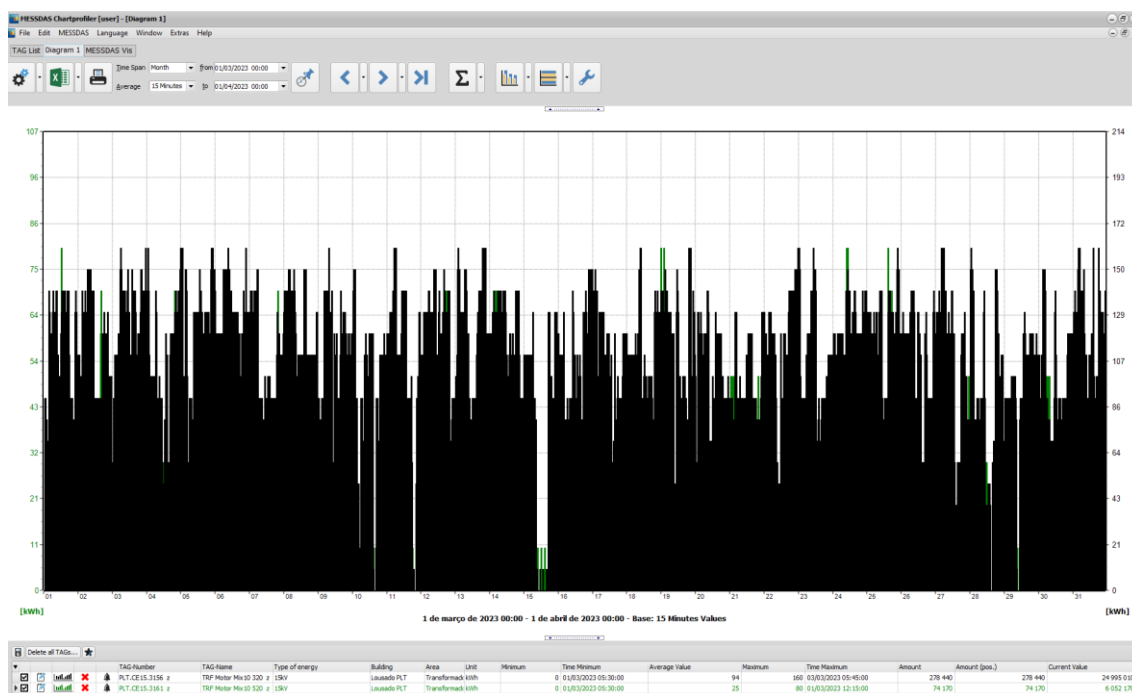


Figura B.4 Consumo elétrico dos motores do misturador 10 em março

O período de tempo a visualizar (ex.: dia, semana, mês, ano) e a base de tempo com que os dados são fornecidos (ex.: 15 minutos, 30 minutos, 1 hora) podem ser alterados nas respetivas caixas situadas acima do gráfico. O tipo de visualização também pode ser alterado para um gráfico de linhas, por exemplo.

Mais uma vez, os dados podem ser exportados para um ficheiro Excel, no qual cada valor está associado a uma data e a uma hora. A interpretação dos valores depende do gráfico escolhido. Se for o gráfico de barras, cada valor deve ser interpretado como sendo a energia consumida entre o último registo e o atual. Se for o gráfico de linhas, cada valor deve ser interpretado como sendo a soma do registo atual com o anterior. A base de tempo escolhida para retirar os dados foi de 1 hora, pelo facto de permitir obter um número de resultados apreciável. De notar que 1 hora é muito superior ao tempo de uma carga, que em média demora 3 minutos.

Relativamente ao *MMS*, os dados foram exportados de 1 de maio de 2022 a 31 de março de 2023 para os misturadores 5, 6, 7, 10, 11 e 12. Os restantes misturadores não apresentam dados de energia no *MMS*. Quanto ao *MESDAS*, os dados foram exportados de 1 de maio de 2022 às 00:00 a 1 de abril de 2023 às 00:00 para os mesmos misturadores.

De notar que ao contrário do *MESSDAS*, os valores exportados do *MMS* apenas estão associados a uma data. Para associar uma hora inicial e uma hora final a cada carga foi necessário exportar os relatórios de produção de 1 de maio de 2022 a 31 de março de 2023 para os misturadores 5, 6, 7, 10, 11 e 12. Na **Figura B.5** é mostrado um excerto do relatório de produção do dia 1 de março.

Date/Time Start: 3/1/2023 Date/Time End: 3/2/2023

Mixer: Mixing Line 05, Mixing Line 06, Mix Compound: OrderID: Language: English

Plant Lousado

report.MixingTimesTitle

Parameters: From: 3/1/2023, To: 3/2/2023
Mixer: ML05, ML06, ML07, ML10, ML11, ML12

MMS Mixing Management System

Equipment	Order ID	Compound Name	Batch Number	Batch Start Time	Batch End Time	Batch Cycle Time Seconds	SCT	CT Deviation	Mixing Time Seconds	Batch Weight	Time between batches
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	3	3/1/2023 12:07:07 AM	3/1/2023 12:09:29 AM	142.0	160	-18.0	114.0	251.2	0:05:24
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	4	3/1/2023 12:14:59 AM	3/1/2023 12:17:21 AM	142.0	160	-18.0	114.0	251.1	0:05:30
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	5	3/1/2023 12:19:07 AM	3/1/2023 12:21:29 AM	142.0	160	-18.0	114.0	251.3	0:01:46
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	6	3/1/2023 12:21:28 AM	3/1/2023 12:23:50 AM	142.0	160	-18.0	114.0	250.0	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	7	3/1/2023 12:25:31 AM	3/1/2023 12:27:53 AM	142.0	160	-18.0	114.0	249.8	0:01:41
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	8	3/1/2023 12:27:52 AM	3/1/2023 12:30:14 AM	142.0	160	-18.0	114.0	252.3	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	9	3/1/2023 12:30:13 AM	3/1/2023 12:32:35 AM	142.0	160	-18.0	114.0	250.8	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	10	3/1/2023 12:32:34 AM	3/1/2023 12:34:56 AM	142.0	160	-18.0	114.0	249.5	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	11	3/1/2023 12:34:55 AM	3/1/2023 12:37:17 AM	142.0	160	-18.0	114.0	251.7	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	12	3/1/2023 12:37:16 AM	3/1/2023 12:39:38 AM	142.0	160	-18.0	114.0	252.1	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	13	3/1/2023 12:39:37 AM	3/1/2023 12:41:59 AM	142.0	160	-18.0	114.0	250.0	0:00:00
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	14	3/1/2023 12:51:24 AM	3/1/2023 12:53:46 AM	142.0	160	-18.0	114.0	250.4	0:09:25
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	15	3/1/2023 12:55:00 AM	3/1/2023 12:57:22 AM	142.0	160	-18.0	114.0	247.8	0:01:14
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	16	3/1/2023 12:57:26 AM	3/1/2023 12:59:48 AM	142.0	160	-18.0	114.0	247.5	0:00:04
ML05	5131287	R1-T17817---- 04 002	17	3/1/2023 12:59:47 AM	3/1/2023 1:02:09 AM	142.0	160	-18.0	114.0	248.0	0:00:00

Figura B.5 Relatório de produção do dia 1 de março para os misturadores 5, 6, 7, 10, 11 e 12

Este relatório é um registo de todas as cargas produzidas no período de tempo e nos misturadores selecionados, no qual se podem consultar as seguintes informações: ordem, composto, nº da carga, misturador, data e hora de início da carga, data e hora de fim da carga, tempo de ciclo, massa da carga, entre outras.

Anexo B.2. Tratamento de dados

Os dados tal e qual como recolhidos não podiam ser diretamente comparados, pelo que foi necessário recorrer a um tratamento que contemplou várias etapas.

Os dados exportados foram separados por mês em diferentes ficheiros.

No caso do *MMS*, todos os valores da curva de energia são exportados, por isso foi necessário calcular o pico máximo de energia em cada carga. Deste modo, obtém-se o consumo elétrico do motor do misturador para cada carga produzida. De salientar que, mesmo que se trate de um misturador *tandem*, o máximo calculado já corresponde à energia consumida pelos dois motores, visto que além do registo cumulativo dos dados, o *MMS* regista na mesma curva a energia consumida enquanto o composto está na câmara de mistura superior e enquanto está na câmara inferior.

Nos misturadores 6, 7, 10, 11 e 12, a escala da curva de energia não é apresentada em kWh, sendo necessário dividir os valores retirados por 10.

No *MESSDAS*, um único valor é exportado por cada 1 hora (base de tempo escolhida), que corresponde ao consumo elétrico do motor do misturador durante esse período. Dado que no *MMS* o consumo de energia não é discriminado por motor, nos casos em que isto acontece no *MESSDAS*, misturadores 10 e 11, somou-se o consumo dos motores superior e inferior.

Relativamente aos relatórios de produção, mantiveram-se as colunas com dados relevantes para o trabalho (“Equipment”, “Order ID”, “Compound Name”, “Batch Number”, “Batch Start Time”, “Batch End Time” e “Batch Weight”) e eliminaram-se as restantes.

De seguida, reuniram-se todos os dados de 1 de maio de 2022 a 31 de março de 2023 dos misturadores 5, 6, 7, 10, 11 e 12 num só ficheiro de Excel, separando os dados provenientes das três fontes referidas em folhas diferentes: “Produção MMS”, “Energia MMS” e “Energia MESSDAS”.

Por último, fundiram-se as tabelas das folhas “Produção MMS” e “Energia MMS” numa só tabela “Produção e Energia MMS” com base nas colunas comuns: misturador, ordem, composto, carga e data. Dada a extensão desta base de dados (+590.000 linhas), a **Tabela B.2** contém apenas a primeira carga de março de 2023 para cada misturador.

Tabela B.2 Excerto da base de dados "Produção e Energia MMS" (primeira carga de março)

Misturador	Ordem	Composto	Carga	Data/hora início	Data/hora fim	Massa carga (kg)	Energia MMS (kWh)
ML05	5131287	R1T17817	3	01/03/2023 00:07	01/03/2023 00:09	251,20	78,00
ML06	5132390	MAT18191	8	01/03/2023 00:00	01/03/2023 00:04	247,44	27,00
ML07	5131042	M1T13069	49	01/03/2023 00:01	01/03/2023 00:06	276,50	36,20
ML10	5131311	FMFT18191W	2	01/03/2023 00:00	01/03/2023 00:03	255,13	16,50
ML11	5130995	M1T79051	91	01/03/2023 00:02	01/03/2023 00:04	442,99	41,00
ML12	5130950	M1B00163	82	01/03/2023 00:02	01/03/2023 00:05	415,21	45,50

Nem todas as linhas da tabela “Energia MMS” fizeram correspondência com as linhas da tabela “Produção MMS”. A correspondência foi feita de forma exata, ou seja, o valor de energia da tabela “Energia MMS” só era alocado à tabela “Produção MMS” se o misturador, a ordem, o composto, a carga e a data fossem exatamente iguais em ambas as tabelas. Desta forma, foi possível compilar numa só tabela todos os dados do MMS. Além disso, os valores de energia que na tabela “Energia MMS” estavam associados a uma data passam agora a estar associados a uma data/hora de início e a uma data/hora de fim, elementos estes que são cruciais para a aplicação do método de comparação.

Anexo B.3. Método de comparação

Esta fase consiste em criar uma nova tabela a partir da “Produção e Energia MMS” e da “Energia MESSDAS”. Desta vez, não é possível fazer uma correspondência exata, porque a data/hora de início e a data/hora de fim da “Produção e Energia MMS” não são exatamente iguais às data/hora de início e data/hora de fim da “Energia MESSDAS”.

Primeiramente, fez-se corresponder à data/hora de início da “Energia MESSDAS” a data/hora de início mais próxima da “Produção e Energia MMS” e fez-se o mesmo para a data/hora de fim. De seguida, calculou-se o novo valor de “Energia MMS”, que é dado pela soma dos valores de energia da “Produção e Energia MMS” compreendidos no intervalo de data/hora de início e data/hora de fim criados no passo anterior. Aqui, é importante verificar a condição de que os valores de energia somados são referentes ao mesmo misturador.

Por último, para que o método de comparação seja válido têm de se comparar valores de energia em tempos iguais. Para isso, aplicaram-se os filtros seguintes:

- Tempo total = 1 hora $\pm$ 30 segundos: Para eliminar períodos do *MMS* que têm uma duração superior a 1 hora, considerando uma tolerância de 30 segundos;
- Tempo entre cargas $<$ ou $=$ 10 minutos: Para eliminar períodos que têm pausas superiores a 10 minutos entre cargas, pois a energia gasta durante estes períodos é contabilizada pelo *MESSDAS*, mas não pelo *MMS*;
- Diferença da hora de início $<$ ou $=$ 10 minutos: Para eliminar períodos em que a hora de início do *MMS* se afasta mais do que 10 minutos da hora de início do *MESSDAS*.

O tempo entre cargas foi calculado pela diferença entre o tempo total e o tempo de cargas. O tempo de cargas foi calculado a partir da soma do tempo de todas as cargas que foram realizadas no período de 1 hora.

Na nova tabela constam os valores fornecidos pelo *MMS* e pelo *MESSDAS* para a energia consumida pelo motor no mesmo misturador e no mesmo período de tempo.

A dimensão da tabela (+10.000 linhas) impossibilita a sua apresentação na íntegra. A **Tabela B.3** mostra somente o primeiro período de 1 hora de março de 2023 para os misturadores 5, 6, 7, 10 e 12 e o primeiro período de 1 hora de agosto de 2022 para o misturador 11.

Tabela B.3 Energia MESSDAS e MMS para o mesmo misturador e período de tempo

Misturador	Data/hora início MESSDAS	Data/hora fim MESSDAS	Energia MESSDAS (kWh)	Data/hora início MMS	Data/hora fim MMS	Energia MMS (kWh)	Tempo total	Tempo de cargas	Tempo entre cargas	Diferença da hora de início
ML05	01/03/2023 02:00	01/03/2023 03:00	460,44	01/03/2023 01:58	01/03/2023 02:59	1646,00	01:00:24	00:56:01	00:04:23	00:01:20
ML06	02/03/2023 02:00	02/03/2023 03:00	486,00	02/03/2023 01:56	02/03/2023 02:57	382,20	01:00:17	00:53:53	00:06:24	00:03:08
ML07	01/03/2023 09:00	01/03/2023 10:00	315,00	01/03/2023 08:56	01/03/2023 09:57	290,20	01:00:03	00:58:32	00:01:31	00:03:03
ML10	01/03/2023 13:00	01/03/2023 14:00	710,00	01/03/2023 12:59	01/03/2023 13:59	727,50	00:59:51	00:56:18	00:03:32	00:00:19
ML11	01/08/2022 03:00	01/08/2022 04:00	1090,00	01/08/2022 02:59	01/08/2022 03:59	984,00	00:59:51	00:57:44	00:02:07	00:00:23
ML12	02/03/2023 07:00	02/03/2023 08:00	680,00	02/03/2023 06:58	02/03/2023 07:58	681,50	01:00:06	00:52:55	00:07:11	00:01:46

Repare-se que os tempos nas colunas “tempo total”, “tempo entre cargas” e “diferença da hora de início” obedecem às condições impostas anteriormente. Estas condições permitem aproximar as datas/horas de início e de fim dos períodos do *MESSDAS* e do *MMS*, bem como a duração dos mesmos para que a comparação dos valores de energia entre os dois sistemas seja o mais correta possível.

Anexo B.4. Resultados

No ficheiro Excel foi criado um gráfico *pivot* com todos os resultados do período de maio de 2022 a março de 2023. Os gráficos de colunas empilhadas das **Figuras B.6, B.7 e B.8** apresentam apenas um excerto do *pivot* correspondente aos períodos de 1 hora do mês de março.

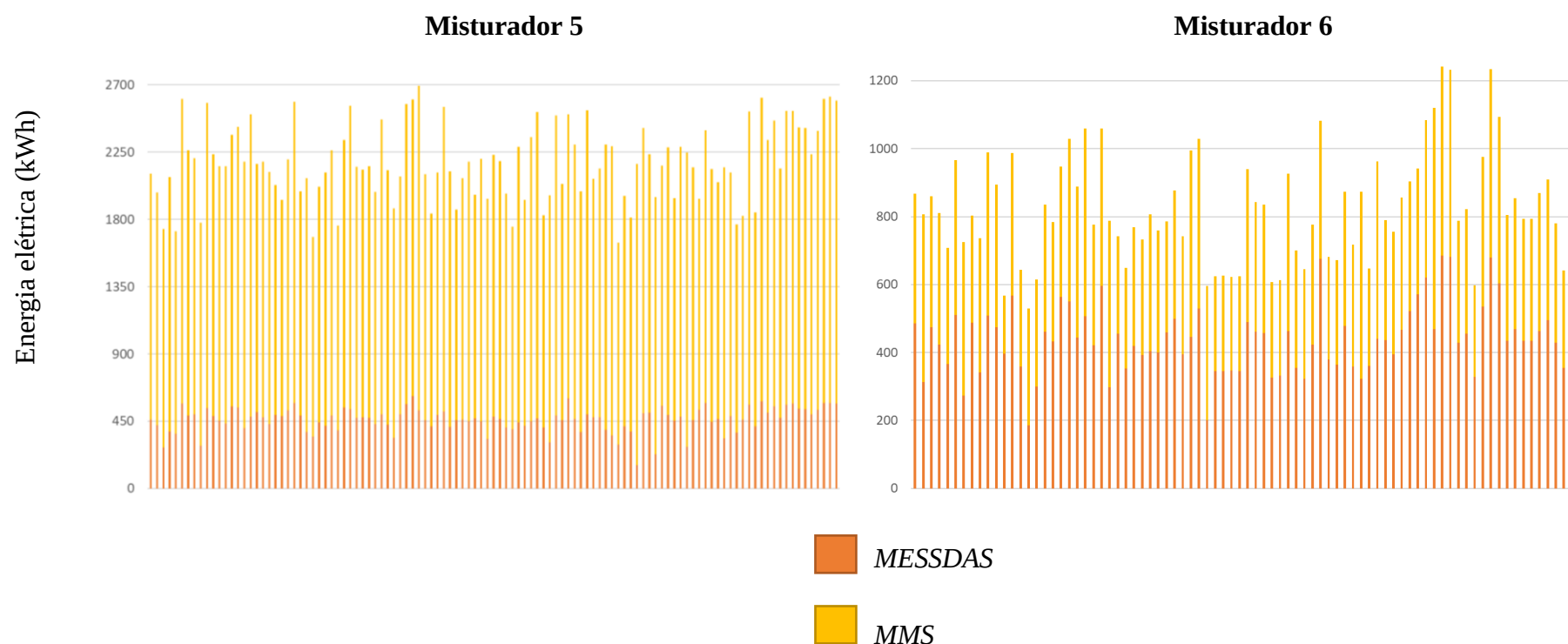


Figura B.6 Consumo elétrico dos motores dos misturadores 5 e 6

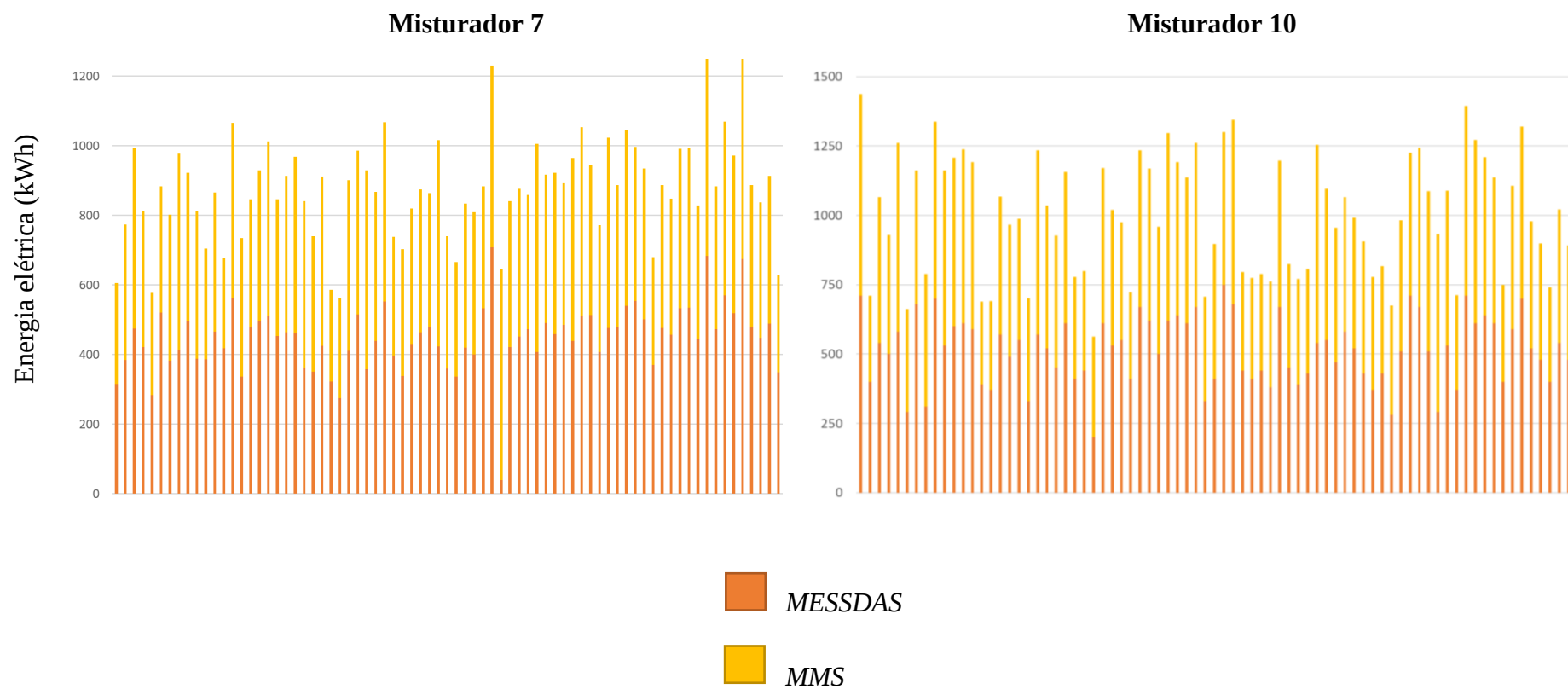


Figura B.7 Consumo elétrico dos motores dos misturadores 7 e 10

No caso do misturador 11, o gráfico mostra o consumo elétrico dos motores nos períodos de 1 hora referentes ao mês de agosto.

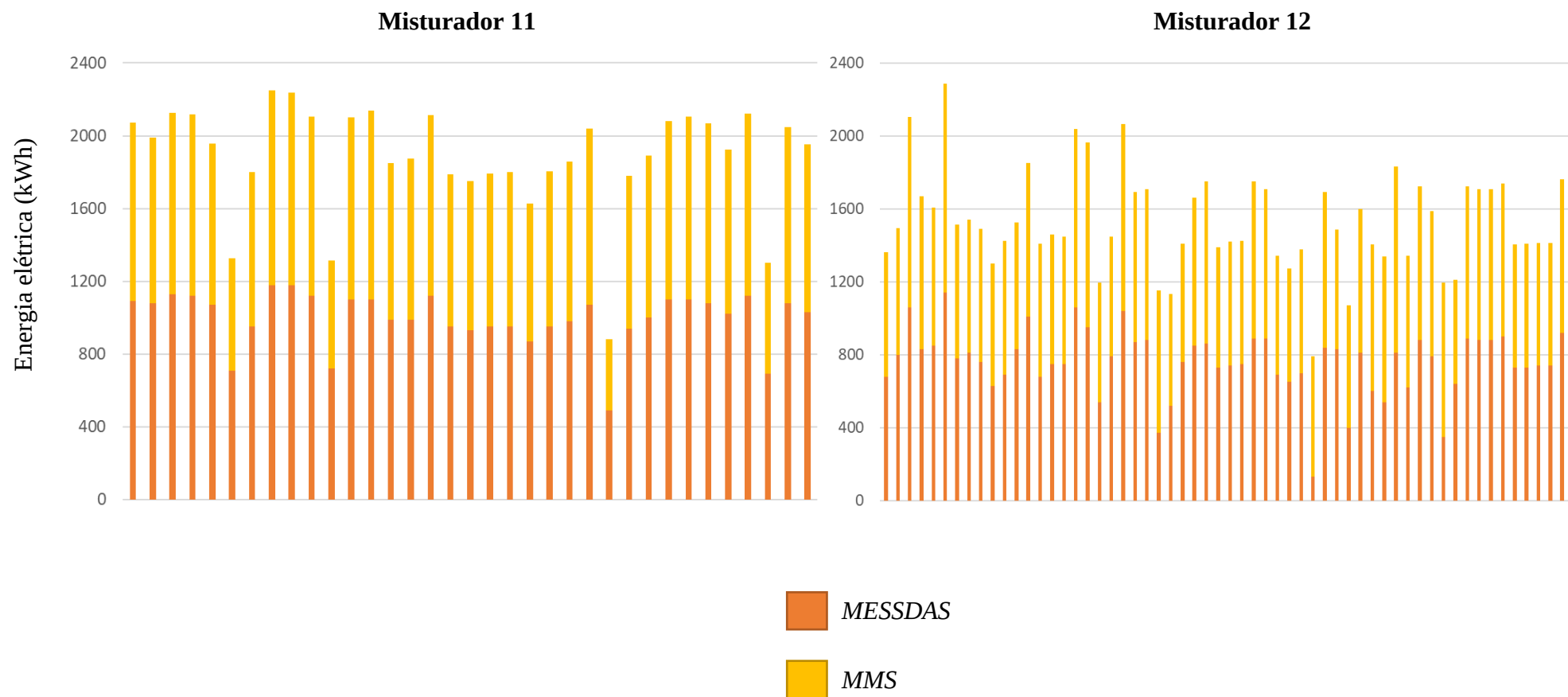


Figura B.8 Consumo elétrico dos motores dos misturadores 11 e 12

Anexo B.4.1 Análise das correlações obtidas

As **Figuras B.9, B.10 e B.11** mostram as retas de ajuste obtidas utilizando todos os pontos, ou seja, previamente à eliminação de pontos segundo o critério de desvio relativo, para os misturadores 6, 7, 10, 11 e 12.

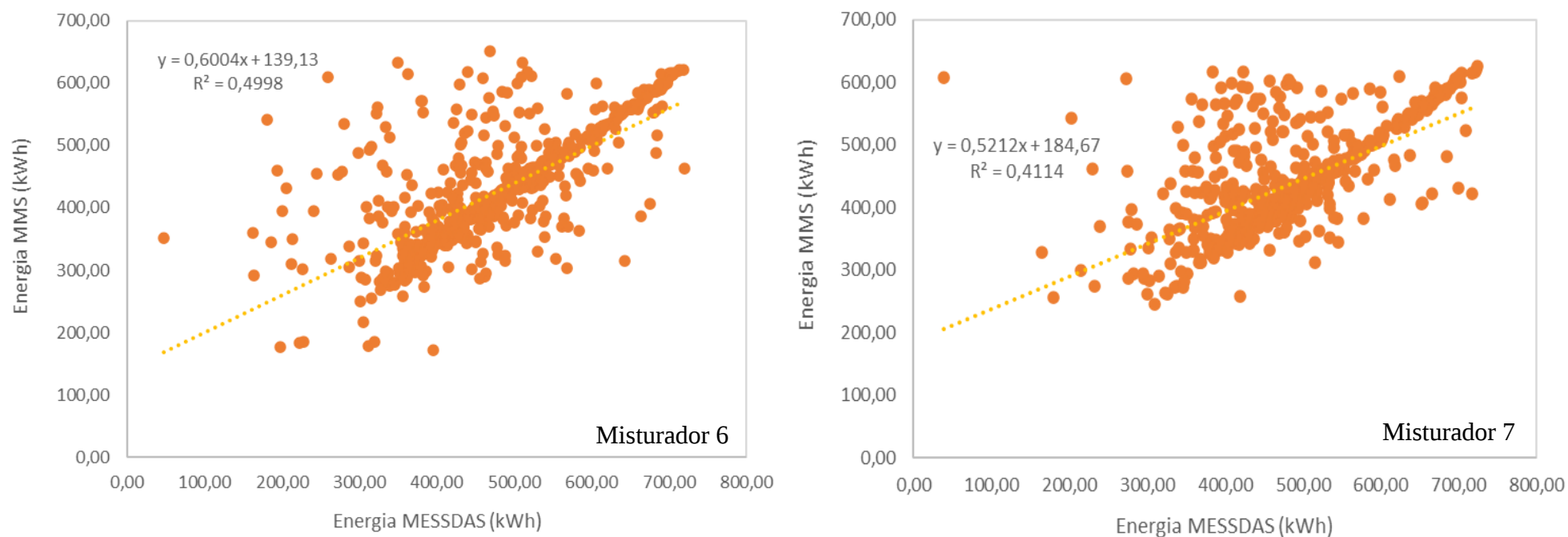


Figura B.9 Retas de ajuste para os misturadores 6 e 7

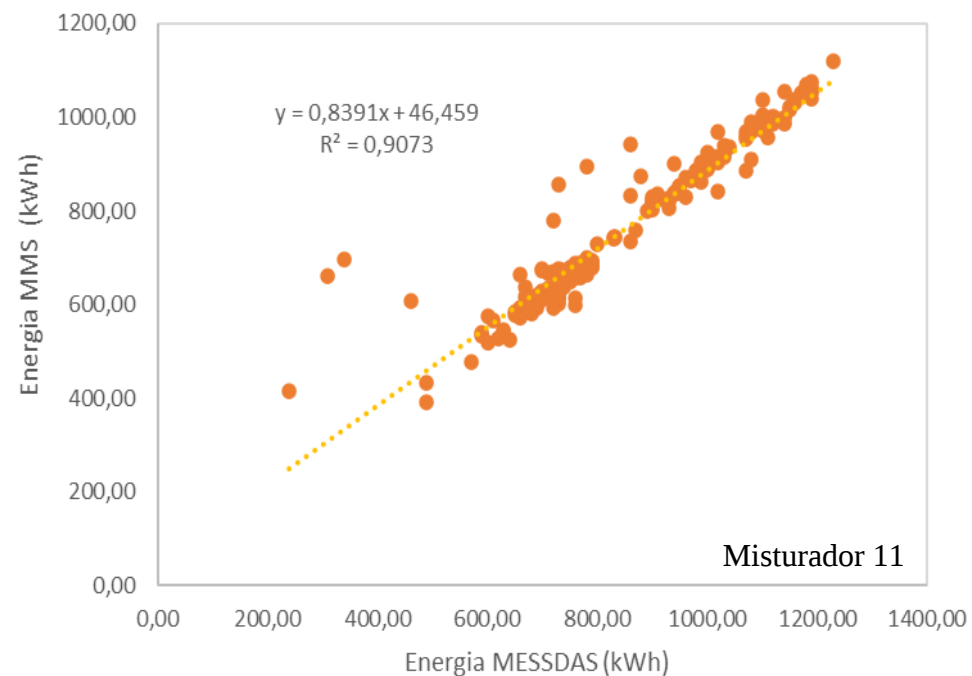
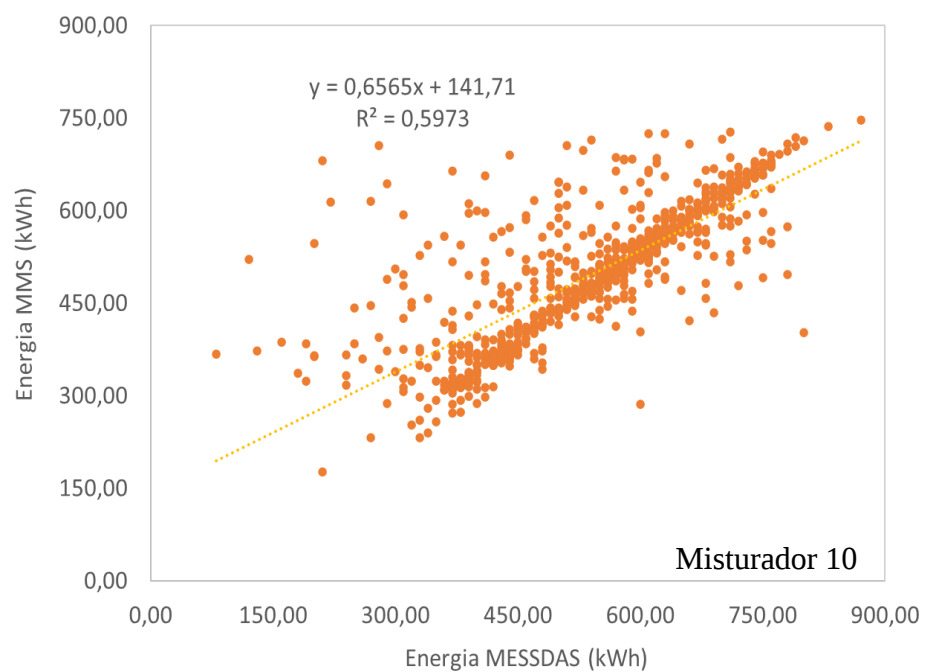


Figura B.10 Retas de ajuste para os misturadores 10 e 11

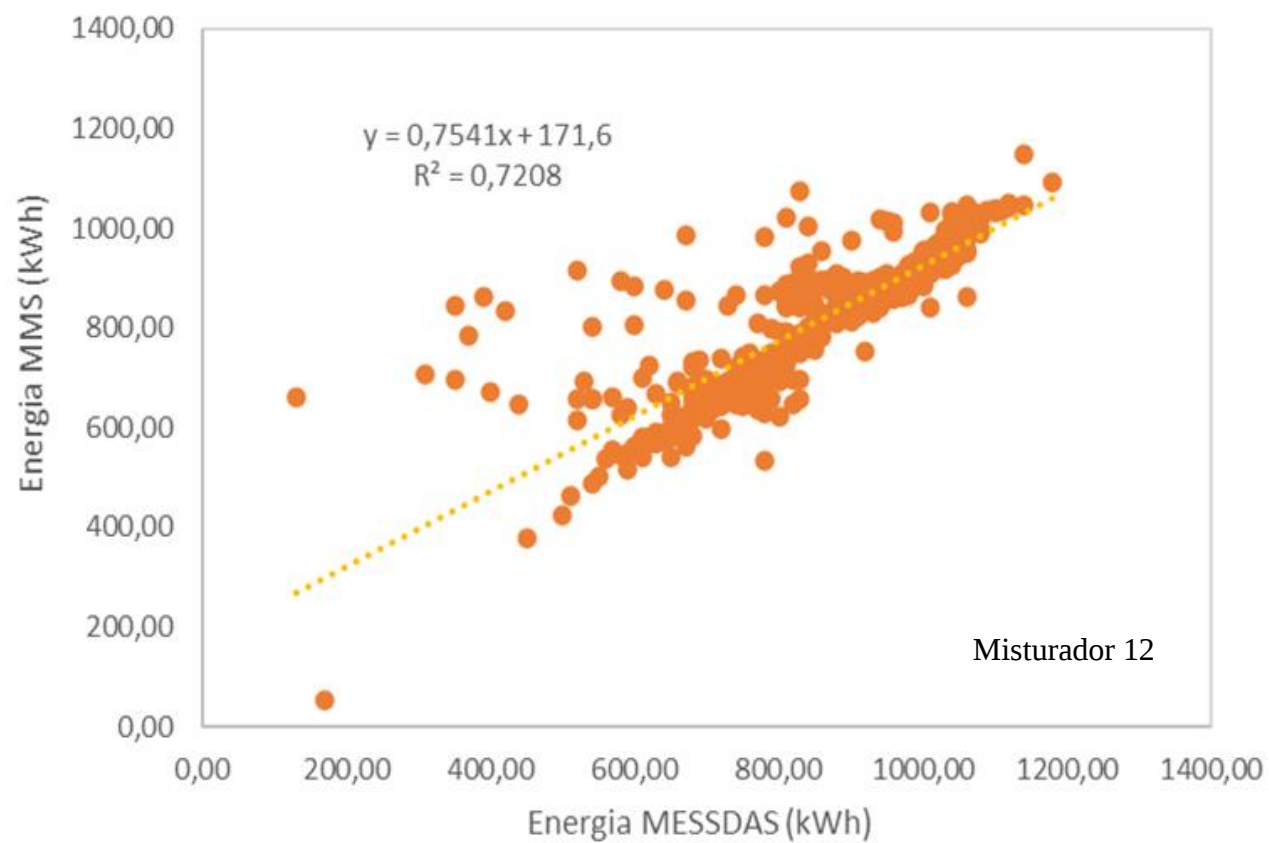


Figura B.11 Reta de ajuste para o misturador 12

Anexo B.4.2 Análise estatística

Neste anexo é apresentado um exemplo dos cálculos efetuados no âmbito da análise estatística de *t* de *Student* para o misturador 10.

Primeiramente, utilizou-se a função “INVT” do Excel para determinar o valor de *t*, considerando um nível de confiança de 95% e o número de graus de liberdade calculado de acordo com a **Equação B.1**.

$$\text{Graus de Liberdade} = N^{\circ} \text{ de observações} - N^{\circ} \text{ de variáveis} \quad (\text{Equação B.1})$$

O número de observações corresponde ao número de pontos que, neste caso, é 706. O número de variáveis é igual a 2 em todos os casos: energia *MESSDAS* e energia *MMS*. Assim, obtém-se 704 graus de liberdade e o valor de *t* de *Student* correspondente é 1,963.

De seguida, recorre-se à função “PROJ.LIN” do Excel para obter o valor do declive (*m*) e da ordenada na origem (*b*), bem como as respetivas incertezas. Utilizando os dados do misturador 10, a função devolve os seguintes valores: *m* = 0,8843; *b* = 11,21; incerteza(*m*) = 0,01156; incerteza(*b*) = 6,436.

Por fim, calculam-se os parâmetros *t*(*m*) e *t*(*b*) através das **Equações B.2 e B.3**, isto é, dividindo os erros pelas respetivas incertezas. O erro associado ao declive é obtido subtraindo o valor real do declive pelo valor pretendido (*m* = 1). Da mesma forma, para obter o erro associado à ordenada na origem, subtrai-se o valor real da ordenada na origem pelo valor desejado (*b* = 0).

$$t(m) = \frac{\text{erro}(m)}{\text{incerteza}(m)} \rightarrow t(m)_{\text{misturador 10}} = \frac{|0,8843-1|}{0,01156} = 10,01 \quad (\text{Equação B.2})$$

$$t(b) = \frac{\text{erro}(b)}{\text{incerteza}(b)} \rightarrow t(b)_{\text{misturador 10}} = \frac{|11,21-0|}{6,436} = 1,741 \quad (\text{Equação B.3})$$

Se *t*(*m*) e *t*(*b*) forem inferiores ao *t* de *Student* pode assumir-se que o modelo *y=x* é aceite com um grau de confiança de 95%. Neste caso, rejeita-se o modelo porque *t*(*m*) é superior ao valor de *t* de *Student*.

Anexo C – Consumos energéticos específicos no setor de misturação

Este anexo apresenta os dados relativos ao **capítulo 6** – consumos energéticos específicos (CEE) no setor de misturação.

Na primeira parte, os dados de energia do *MMS* foram validados, o que permitiu que se desse seguimento ao trabalho com a determinação dos CEE dos compostos produzidos nos misturadores 6, 7, 10, 11 e 12.

À tabela de dados criada anteriormente, “Produção e Energia MMS”, adicionaram-se os dados até 21 de maio de 2023. De seguida, inseriu-se a coluna “CEE”, calculada através do quociente entre a energia consumida pela carga em kWh e a massa da respetiva carga em toneladas. Assim, a cada carga ficou associado um valor de energia consumida por tonelada de composto produzido. A partir desta base de dados, criaram-se duas tabelas dinâmicas para caracterizar os CEE por misturador e por composto.

Embora as tabelas apresentem dados para o período de um ano, desde maio de 2022 a maio de 2023, para efeitos de análise considerou-se um período mais recente, de 1 de janeiro a 21 de maio de 2023.

Anexo C.1 Caracterização por misturador

A tabela dinâmica criada para esta análise permite associar a cada misturador, o valor médio de CEE e o valor total de massa de composto produzida, tal como se visualiza na **Tabela C.1**.

Tabela C.1 CEE médio e massa total de composto para cada misturador em 2023

Misturador	CEE médio (kWh/t)	Massa total de composto (kg)
ML06	116,35	6,38E+06
ML07	124,90	9,26E+06
ML10	119,09	1,10E+07
ML11	102,15	2,21E+07
ML12	104,84	2,26E+07

O CEE médio e a massa total apresentados englobam todas as cargas realizadas no respetivo misturador, independentemente do composto.

Anexo C.2 Caracterização por composto

A tabela dinâmica criada para esta análise permite visualizar para cada composto o valor médio de CEE em cada um dos misturadores, e ainda a distribuição da produção do composto pelos misturadores, tal como se apresenta na **Tabela C.2**. Nesta tabela constam todos os compostos que foram selecionados com base no facto de terem produção em mais do que um misturador em 2023, exceto os mais produzidos, que já foram apresentados no corpo do relatório. Foi a partir desta ferramenta de cálculo que se fizeram todas as análises sucedentes.

Tabela C.2 CEE médio e distribuição da produção por misturador em 2023

	ML06		ML07		ML10		ML11		ML12	
Composto	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod	CEE médio (kWh/t)	% Prod
M1-T01102		0,00%	145,50	99,71%		0,00%		0,00%	124,03	0,29%
M1-T17513	196,98	4,95%	186,48	75,94%	221,36	19,11%		0,00%		0,00%
R1-T16734		0,00%	76,62	19,73%	100,78	80,27%		0,00%		0,00%
M1-T13127		0,00%		0,00%	157,55	38,68%	135,35	61,32%		0,00%
M1-T33025		0,00%		0,00%	163,21	65,97%	150,00	34,03%		0,00%
MA-B02516	102,08	4,28%	104,14	32,23%	142,18	63,49%		0,00%		0,00%
M1-T15577		0,00%		0,00%	156,87	53,78%	132,54	46,22%		0,00%
M1-T02022	154,34	43,39%	163,80	8,25%	170,15	48,36%		0,00%		0,00%
M1-T17817	138,73	50,31%	148,57	9,73%	158,11	39,96%		0,00%		0,00%
WO-H06996YWM		0,00%		0,00%		0,00%	47,21	96,74%	41,14	3,26%
M1-T09170	138,88	1,41%	143,45	98,59%		0,00%		0,00%		0,00%
R1-T02022	72,39	57,15%	72,83	6,70%	93,74	33,71%	89,81	2,44%		0,00%
M1-T15921		0,00%		0,00%	166,15	91,74%	158,39	8,26%		0,00%
M1-B02516		0,00%		0,00%	126,58	27,64%		0,00%	103,70	72,36%
PB-H06996YWM		0,00%		0,00%		0,00%	136,89	98,10%	132,10	1,90%

Tabela C.2 CEE médio e distribuição da produção por misturador em 2023 (Continuação)

R1-T15026	100,45	39,83%	89,97	60,17%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-T00011	97,51	6,51%	104,96	34,14%		0,00%		0,00%	109,66	59,35%
R1-T13127		0,00%		0,00%	99,22	54,65%	88,12	45,35%		0,00%
M1-T17478	139,32	41,72%	139,35	48,40%	160,38	9,89%		0,00%		0,00%
M1-T50505	146,15	43,67%	142,71	56,33%		0,00%		0,00%		0,00%
R1-T09170	70,50	4,23%	74,05	95,77%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-T17036	161,42	76,12%	160,61	3,96%	171,69	19,92%		0,00%		0,00%
M1-T16734		0,00%		0,00%	142,43	38,07%	140,64	61,93%		0,00%
R1-T32323	80,63	93,55%	75,79	6,45%		0,00%		0,00%		0,00%
R1-T01102	65,36	16,13%	69,95	83,87%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-T02128	134,00	72,83%	132,34	8,15%	162,81	19,02%		0,00%		0,00%
M1-T16665	144,29	52,26%	146,97	47,74%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-H70077		0,00%		0,00%		0,00%	100,28	75,00%	96,48	25,00%
M1-T45023	160,69	4,24%		0,00%	169,49	95,76%		0,00%		0,00%
M1-T02067	113,84	78,23%		0,00%	123,75	21,77%		0,00%		0,00%
M1-T32323	155,94	93,13%	152,67	6,87%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-T17952		0,00%		0,00%	208,66	31,61%	201,59	68,39%		0,00%
RCL-H88024	79,60	7,94%	118,18	9,52%	88,94	65,08%	140,14	11,11%	134,71	6,35%
M2-T45023	91,34	3,88%		0,00%	95,85	96,12%		0,00%		0,00%
M1-T19409		0,00%		0,00%	153,05	88,12%	126,80	11,88%		0,00%
M1-T02107	135,14	53,82%	145,00	46,18%		0,00%		0,00%		0,00%
R1-T79051		0,00%		0,00%		0,00%	80,61	61,42%	80,26	38,58%
M1-T15026	142,93	30,51%	142,52	51,06%	142,56	18,44%		0,00%		0,00%

Tabela C.2 CEE médio e distribuição da produção por misturador em 2023 (Continuação)

PB-H06996Y		0,00%		0,00%		0,00%	134,67	77,78%	138,45	22,22%
M1-T11347	137,11	42,78%	137,88	57,22%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-T13612	153,70	37,37%	151,99	62,63%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-T00509	135,06	83,33%		0,00%	152,50	16,67%		0,00%		0,00%
R1-T11131	68,51	85,48%	70,96	14,52%		0,00%		0,00%		0,00%
M1-B70854		0,00%		0,00%		0,00%	103,51	19,24%	103,12	80,76%
M1-T14663	139,60	77,77%		0,00%	139,68	22,23%		0,00%		0,00%

Anexo C.3 Alocação por CEE

Para cada um dos compostos, determinou-se o CEE atual utilizando a **Equação 6.2**.

$$CEE_{atual} = \sum \left(CEE_{medio_i} * \frac{\%Prod_i}{100} \right) \quad (\text{Equação 6.2})$$

Tal como se vê, o CEE atual de um dado composto resulta da média ponderada dos misturadores, i, que produzem esse composto.

De seguida, a cada um dos compostos atribuiu-se o CEE novo, que corresponde ao menor valor de CEE obtido pelos misturadores. A título de exemplo, o CEE novo dado ao 1º composto da **Tabela C.2** – M1-T01102 – foi o do ML12: 124,03 kWh/t.

Assim, propôs-se alocar a produção total de cada composto a um único misturador, sendo este o que permite minimizar o consumo específico. A esta alocação está associada uma poupança que equivale à diferença entre os valores de CEE atual e novo, tal como mostra a **Equação C.1**.

$$Poupança \left(\frac{kWh}{t} \right) = CEE_{atual} - CEE_{novo} \quad (\text{Equação C.1})$$

Conhecendo as toneladas de composto produzidas, pode determinar-se a poupança energética. Neste caso, optou-se por determinar a poupança anual, através da **Equação C.2**, utilizando-se para isso a produção de composto no período de maio de 2022 a maio de 2023.

$$Poupança \text{ anual } (kWh) = Poupança \left(\frac{kWh}{t} \right) * Produção \text{ anual } (t) \quad (\text{Equação C.2})$$

A partir da **Equação C.3**, estimou-se a poupança anual associada à nova alocação, sabendo que o preço contratado de energia elétrica na CMIP é 0,15€/kWh.

$$Poupança \text{ anual } (€) = Poupança \text{ anual } (kWh) * Preço \left(\frac{€}{kWh} \right) \quad (\text{Equação C.3})$$

A **Tabela C.3** apresenta o CEE atual, o CEE novo, a poupança por tonelada, a produção anual e a poupança anual, energética e económica, para todos os compostos anteriores, exceto os que obtiveram melhores resultados, que já foram apresentados no corpo do relatório. Os compostos estão dispostos por ordem decrescente de poupança anual.

Tabela C.3 CEE atual, CEE novo, poupança por tonelada, produção anual e poupança anual

Composto	CEE atual (kWh/t)	CEE novo (kWh/t)	Poupança (kWh/t)	Produção anual (t)	Poupança anual (kWh)	Poupança anual (€)
M1-T15921	165,51	158,39	7,12	884,49	6297,77	944,66 €
M1-B02516	110,03	103,70	6,32	927,80	5867,93	880,19 €
PB-H06996YWM	136,80	132,10	4,69	1153,82	5415,01	812,25 €
M1-T17771	136,09	134,81	1,28	4202,71	5394,12	809,12 €
R1-T15026	94,15	89,97	4,17	1282,88	5354,54	803,18 €
M1-T00011	107,26	97,51	9,75	470,46	4589,04	688,36 €
R1-T13127	94,18	88,12	6,07	638,57	3874,00	581,10 €
M1-T17478	141,42	139,32	2,09	1402,73	2938,64	440,80 €
M1-T50505	144,21	142,71	1,50	1665,05	2498,51	374,78 €
R1-T09170	73,90	70,50	3,40	628,15	2136,48	320,47 €
M1-T17036	163,43	160,61	2,82	687,55	1940,61	291,09 €
M1-T16734	141,32	140,64	0,68	2616,78	1775,73	266,36 €
R1-T01139A	106,98	106,46	0,53	2996,66	1577,14	236,57 €
R1-T32323	80,32	75,79	4,53	347,21	1574,21	236,13 €
R1-T01102	69,21	65,36	3,85	373,62	1438,98	215,85 €
M1-T02128	139,35	132,34	7,01	199,42	1397,33	209,60 €
M1-T16665	145,57	144,29	1,28	1036,54	1326,11	198,92 €
M1-H70077	99,33	96,48	2,85	453,93	1292,16	193,82 €
M1-T45023	169,12	160,69	8,43	148,57	1252,25	187,84 €
M1-T02067	116,00	113,84	2,16	554,12	1195,33	179,30 €

Tabela 6.3 CEE atual, CEE novo, poupança por tonelada, produção anual e poupança anual (Continuação)

M1-T32323	155,71	152,67	3,04	337,00	1023,18	153,48 €
M1-T17952	203,83	201,59	2,24	378,39	845,96	126,89 €
RCL-H88024	99,58	79,60	19,98	39,69	793,05	118,96 €
M2-T45023	95,67	91,34	4,33	169,02	732,69	109,90 €
M1-T19409	149,93	126,80	23,13	28,20	652,17	97,83 €
M1-T02107	139,70	135,14	4,55	136,54	621,79	93,27 €
R1-T79051	80,48	80,26	0,21	2062,65	439,67	65,95 €
M1-T15026	142,65	142,52	0,13	2694,26	361,82	54,27 €
FMO-S00211W8	90,85	90,83	0,02	14413,75	269,59	40,44 €
PB-H06996Y	135,51	134,67	0,84	311,77	261,86	39,28 €
M1-T11347	137,55	137,11	0,44	507,55	223,30	33,50 €
M1-T13612	152,63	151,99	0,64	308,93	197,57	29,64 €
M1-T00509	137,97	135,06	2,91	65,85	191,45	28,72 €
M3-B00460	77,25	77,22	0,03	5649,67	176,37	26,46 €
R1-T11131	68,87	68,51	0,36	179,24	63,69	9,55 €
M1-B70854	103,19	103,12	0,08	377,73	28,46	4,27 €
M1-T14663	139,62	139,60	0,02	952,66	16,08	2,41 €

Anexo C.4 Especificações técnicas dos misturadores

A **Tabela C.4** mostra as características técnicas mais relevantes dos misturadores em estudo.

Tabela C.4 Especificações técnicas dos misturadores

Especificações Técnicas	ML06	ML07	ML10	ML11	ML12
Configuração	<i>Single</i>	<i>Single</i>	<i>Tandem</i>	<i>Big Tandem</i>	<i>Big Tandem</i>
Produtos	<i>Masterbatch</i>	<i>Masterbatch</i>	<i>OSM</i>	<i>OSM</i>	<i>OSM</i>
Princípio de mistura	<i>Intermeshing</i>	<i>Intermeshing</i>	<i>Intermeshing</i>	<i>Intermeshing</i>	<i>Intermeshing</i>
Volume total (L)	342	342	961	1547	1547
Rendimento do motor (%)	96,6				

Anexo C.5 Dados dos compostos em análise

Este anexo apresenta os dados relativos aos compostos em análise no **Subcapítulo 6.4**. Na **Tabela C.5** consta a distribuição percentual da produção, o valor médio de energia consumida durante a carga e o valor médio de massa da carga. Esta análise utilizou dados do ano de 2023.

Tabela C.5 Distribuição percentual da produção, valor médio de energia e valor médio de massa da carga dos compostos em análise no ano de 2023

Composto	ML06			ML07			ML10			ML11			ML12		
	%Prod	Energia média (kWh)	Massa média (kg)	%Prod	Energia média (kWh)	Massa média (kg)	%Prod	Energia média (kWh)	Massa média (kg)	%Prod	Energia média (kWh)	Massa média (kg)	%Prod	Energia média (kWh)	Massa média (kg)
M1B00163	0,00%			0,00%			0,00%			59,20%	48,48	416,88	40,80%	45,46	415,39
M1B00458	0,00%			0,00%			0,00%			62,80%	46,64	448,37	37,20%	47,45	446,76
M1T13127	0,00%			0,00%			38,68%	39,50	250,72	61,32%	62,64	462,79	0,00%		
M1T17817	50,31%	36,91	266,04	9,73%	39,46	265,57	39,96%	42,07	266,06	0,00%			0,00%		
M1T33025	0,00%			0,00%			65,97%	40,93	250,76	34,03%	65,36	435,70	0,00%		
MAB02516	4,28%	22,70	222,37	32,23%	21,78	209,17	63,49%	32,80	230,68	0,00%			0,00%		
R1R00218A	35,08%	21,68	230,66	50,08%	22,41	231,13	14,50%	26,12	231,41	0,04%	43,00	399,72	0,30%	51,68	399,91
R1T01139A	4,48%	19,67	226,14	0,00%			16,33%	26,02	227,25	10,76%	40,55	378,00	68,42%	40,06	376,26
R1T02022	57,15%	18,04	249,19	6,70%	18,24	250,45	33,71%	23,46	250,26	2,44%	39,14	435,84	0,00%		
R1T16734	0,00%			19,73%	19,21	250,78	80,27%	25,02	248,42	0,00%			0,00%		

Após este estudo, foram propostas algumas medidas de melhoria e foram apresentados os respetivos resultados de poupança. A poupança anual foi calculada do mesmo modo que foi explicado no **Anexo C.3**.

Anexo C.6 Processo OSM

Neste anexo encontram-se os exemplos de cálculo relativos à análise do processo OSM.

O composto T18191 pode ser produzido por uma etapa (prefixo usado é “FMO”) ou por duas etapas (prefixos usados são “M1” para o composto *master* e “FMF” para o composto final).

Esta análise comparou o CEE médio associado aos dois processos, sendo estes determinados de acordo com as **Equações C.4 e C.5**.

$$CEE_{Processo\ 2\ etapas} = CEE_{M1-T18191} + CEE_{FMF-T18191} \quad (\text{Equação C.4})$$

$$CEE_{Processo\ OSM} = CEE_{FMO-T18191} \quad (\text{Equação C.5})$$

Por sua vez, a poupança foi calculada pela diferença dos CEE dos dois processos, consoante a **Equação C.6**.

$$Poupança \left(\frac{kWh}{t} \right) = CEE_{Processo\ 2\ etapas} - CEE_{Processo\ OSM} \quad (\text{Equação C.6})$$

Por último, determinou-se a poupança anual associada à implementação do OSM, utilizando-se para isso as **Equações C.2 e C.3**.

Na **Equação C.2** substitui-se a produção anual pela massa total dos compostos M1-T18191 e FMF-T18191 produzida no período de maio de 2022 a maio de 2023. Deste modo, obtém-se a poupança que teria sido alcançada no último ano se o processo de 2 etapas tivesse sido substituído pelo OSM.