



Otimização do Controlo da Temperatura no Processo da Mistura de Compostos de Borracha

BEATRIZ MARIA CARVALHO REIS ALVES

novembro de 2022



Otimização do Controlo da Temperatura no Processo da Mistura de Compostos de Borracha

BEATRIZ MARIA CARVALHO REIS ALVES

Outubro de 2022



OTIMIZAÇÃO DO CONTROLO DA TEMPERATURA NO PROCESSO DA MISTURA DE COMPOSTOS DE BORRACHA

Porto, outubro de 2022

Beatriz Maria Carvalho Reis Alves 1170845

ORIENTAÇÃO

Engenheiro Simão Dias– Continental Mabor Indústria de Pneus S.A.
Engenheira Anabela Guedes – ISEP
Engenheira Madalena Freitas– ISEP

Departamento de Engenharia Química

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

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação resulta do apoio incondicional de várias instituições e pessoas, sem as quais, não teria sido possível realizar este projeto tão desafiante e, portanto, a todos dirijo estes agradecimentos.

Em primeiro, agradeço à Empresa Continental Mabor pela oportunidade que me concederam para a minha primeira experiência profissional no contacto com área industrial, permitindo o meu desenvolvimento ao nível profissional e pessoal e, ainda por todas as condições de trabalho proporcionadas.

Agradeço ao meu orientador da empresa Continental Mabor, Engenheiro Simão Dias, pela forma como me recebeu e por toda a ajuda prestada durante o desenvolvimento do projeto.

Ao Departamento de Industrialização do Produto e a todos os colaboradores um agradecimento por toda a ajuda, apoio, carinho e boa disposição, em especial à Engenheira Mariana Carvalho que esteve sempre disponível para colaborar direta ou indiretamente com as minhas atividades. Obrigado pela confiança, receptividade e por acreditarem nas minhas capacidades.

Ao Departamento de Engenharia Química do ISEP, por me proporcionar este estágio curricular, em particular às minhas orientadoras, Engenheira Maria Madalena Freitas e Engenheira Anabela Guedes, por toda a disponibilidade, preocupação e acompanhamento prestado durante os últimos meses que culminam na finalização desta grande etapa.

Aos meus amigos um agradecimento por toda a paciência, apoio e, principalmente por todos os momentos de partilha ao longo destes 5 anos.

Por fim, um agradecimento especial a toda a minha família pelo apoio incondicional. Por todos os incentivos e por viverem comigo todas as minhas conquistas.

O meu sincero obrigado.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio, integrada no mestrado de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto. O projeto decorreu na empresa Continental Mabor Indústria de Pneus S.A, que se localiza em Vila Nova de Famalicão e teve a duração de 5 meses, decorrendo de forma presencial no Departamento de Industrialização do Produto da empresa.

O estágio teve como principal objetivo a otimização do controlo da temperatura no processo de mistura dos compostos de borracha, através do estudo e implementação de novos valores para os parâmetros do controlador, ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo, de forma a ser possível reduzir a amplitude de variação da temperatura durante a reação de silanização e, consequentemente, permitir a redução das propriedades físicas e viscoelásticas dos compostos.

Numa primeira fase do trabalho, antes de efetuar qualquer tipo de alteração nos parâmetros de controlo, foi pertinente avaliar e caracterizar a situação atual dos controladores PID, sendo possível concluir que, atualmente, os controladores em utilização não estão otimizados em relação ao tempo de resposta, provocando alterações indesejadas nos compostos de borracha. Com base nesta análise, o perfil com a combinação de valores de $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s, apresenta resultados mais satisfatórios quando comparados com os outros perfis existentes e, portanto, os testes práticos terão por base este perfil.

A nível experimental foi necessário recorrer a um processo iterativo, uma vez que, o processo de mistura é bastante complexo, não sendo possível, através de nenhum método, calcular os valores das estimativas iniciais dos parâmetros do controlador. Assim, os testes realizados foram agrupados em 3 grandes conjuntos, onde cada um teve como principal objetivo avaliar cada uma das ações de controlo. De notar que, de modo a facilitar análise dos testes práticos destacaram-se duas características que permitem descrever a resposta do sistema, o tempo de subida e o *overshoot*.

Relativamente aos parâmetros de controlo, após a realização dos testes práticos, concluiu-se que, para valores superiores de ganho proporcional, o controlador reage de forma mais rápida e, consequentemente, a temperatura atinge o valor de referência mais rápido. Para o tempo integral, quanto menor é o seu valor, menor é a temperatura máxima atingida e, portanto, menor é o valor de *overshoot* e, finalmente, à medida que se aumenta o valor do tempo derivativo, verifica-se uma maior oscilação na resposta do sistema.

De todos os testes práticos realizados, o perfil cuja combinação de valores é $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s, foi o que apresentou os resultados mais satisfatórios, tendo em conta o compromisso existente entre as variáveis de controlo. Por um lado, o perfil original com a combinação de valores de $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s, possui um tempo de subida médio de 7,6 segundos, sendo que, após a passagem pela referência, as cargas atingiram temperaturas máximas entre 172°C e 174°C, correspondendo a valores de *overshoot* entre 4,2% e 5,4%. Por outro lado, o perfil 28, apresentou uma maior estabilidade nas respostas, com um tempo de subida médio de 6,5 segundos, onde as cargas exibiram valores de temperatura máxima de 170°C, ou seja, verificaram-se melhorias significativas nos valores de *overshoot* com uma diminuição de 43% relativamente aos valores de *overshoot* do perfil original.

Em suma, avaliando os resultados obtidos para todos os testes efetuados ao longo do trabalho experimental, torna-se possível concluir que, os valores relativos aos parâmetros do controlador PID $K_P=28$; $\tau_i=1$ segundo; $\tau_D=0,225$ segundos originam um melhor desempenho do sistema comparativamente com os valores dos parâmetros originais e em utilização pela empresa.

Palavras-Chave: Misturação; Reação de Silanização; Controladores; Parâmetros de Controlo;

ABSTRACT

The present work was developed within the scope of the curricular Dissertation/Internship unit, integrated in the Master's Degree in Chemical Engineering at the Instituto Superior de Engenharia do Porto. The project took place at Continental Mabor Indústria de Pneus S.A, located in Vila Nova de Famalicão, lasted 5 months and was held in person at the company's Product Industrialization Department.

The main objective of this research was to optimise the temperature control for the mixing process of the rubber compounds, through the study and implementation of new values for the parameters of the controller, proportional gain, integral time and derivative time, in order to be possible to reduce the range of temperature variation during the silanisation reaction and to consequently reduce the physical and viscoelastic properties of the compounds.

In a first stage of the work, before making any changes in the control parameters, it was relevant to evaluate and characterize the current situation of the PID controllers, being possible to conclude that, currently, the controllers used are not optimized in relation to the response time, causing unwanted changes in the rubber compounds. Based on this analysis, the profile with the combination $K_P=11$; $\tau_i=2.5$ s; $\tau_D=0$ s, presented more satisfactory results when compared to the values of the other existing profiles. For this reason, the experimental tests were based on this profile.

On an experimental level, it was necessary to use an iterative process, since the mixing process is quite complex, not being possible, through any method, to calculate the values of the initial estimates for the controller parameters. Therefore, the tests performed were grouped in 3 large sets, where each one had as main goal to evaluate each one of the control actions. In order to facilitate the analysis of the experimental tests, two characteristics of the response that describe the system were highlighted: the rise time and the overshoot.

Regarding the PID controller parameters, after carrying out the experimental tests, it was concluded that, for higher values of proportional gain, the controller reacts faster and, consequently, the temperature reaches the reference value faster. For the integral time, and the lower its value, the lower the maximum temperature reached, therefore, the lower the overshoot value. Finally, as the value of the derivative time increases, a greater oscillation in the system response can be verified.

Of all the experimental tests carried out, the profile that presented the best results was the one which combined the values $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0.225$ s presented the most satisfactory results, considering the existing compromise between the control variables. On the one hand, the original profile, with presented the combination of $K_P=11$; $\tau_i=2.5$ s; $\tau_D=0$ s, has an average rise time of 7.6 seconds, and, after passing through the reference, the loads reached maximum temperatures between 172°C and 174°C, corresponding to overshoot values between 4.2% and 5.4%. Profile 28, on the other hand, presented a greater stability in the responses, with an average rise time of 6.5 seconds, where the loads exhibited maximum temperature values of 170°C, meaning a significant improvement in overshoot values with a 43% decrease in relation to the original profile overshoot values.

In conclusion, by analyzing the results obtained for all the tests carried out throughout the experimental work, it was possible to conclude that the new values of the parameters of the PID controller $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0.225$ s, provides a better performance of the system when compared to the original parameters used by the company.

Keywords: Mixing; Silanisation reaction; PID Controllers; Control parameters;

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Objetivos de Trabalho.....	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Processo de Fabrico do Pneu	5
2.1	Pneu e a sua Estrutura.....	5
2.2	Matérias Primas que constituem o Pneu.....	6
2.2.1	Polímeros.....	7
2.2.2	Enchedores	8
2.2.3	Agentes de Proteção.....	9
2.2.4	Auxiliares de Processamento.....	9
2.2.5	Agentes de Vulcanização	10
2.3	Processo Produtivo	11
2.3.1	Misturação	11
2.3.2	Preparação	12
2.3.3	Construção.....	14
2.3.4	Vulcanização	14
2.3.5	Inspeção Final.....	14
2.4	Etapa de Misturação	15
3	Controlo de Processos	19
3.1	Tipo de Controladores	20
3.1.1	Controlador Proporcional (P)	21
3.1.2	Controlador Proporcional Integral (PI).....	21
3.1.3	Controlador Proporcional Derivativo (PD).....	21
3.1.4	Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).....	22
3.2	Sintonização de Controladores.....	25
3.2.1	Métodos de Sintonização com Conhecimento do Modelo do Processo .	25
3.2.2	Métodos de Sintonização com Modelos Aproximados	25
3.2.3	Métodos de Sintonização Online	26
4	Otimização do Controlo da Temperatura no Interior do Misturador	29
4.1	Problema Proposto.....	29
4.2	Condições Operatórias Atuais.....	32
4.3	Levantamento de Resultados	36
4.4	Validação da Combinação Escolhida	56
5	Conclusão e Sugestões de Trabalhos Futuros.....	65

Bibliografia.....	67
ANEXOS.....	71
Anexo A- Testes Práticos com Utilização dos Perfis Disponíveis	71
Anexo B- Testes Práticos com Alteração do Ganho Proporcional.....	75
Anexo C- Testes Práticos com Alteração do Tempo Integral	81
Anexo D- Testes Práticos de Ajuste nos Parâmetros Proporcional e Integral	87
Anexo E- Testes Práticos com Introdução do Tempo Derivativo	103
Anexo F- Testes Práticos de Ajuste Final	109
Anexo G- Testes Práticos para Validação da Combinação Escolhida.....	121
Anexo H- Comparação do Perfil Atual com o Perfil Escolhido.....	125

Índice de Figuras

Figura 1.1: Área das instalações da Continental Mabor (Vieira, 2020).	3
Figura 2.1: Representação dos principais componentes que constituem um pneu (Continental AG , 2018).....	5
Figura 2.2: Principais grupos de matérias-primas utilizadas no processo de fabrico do pneu (adaptado de (DIP-materiais, 2018)).	7
Figura 2.3: Reação de silanização para formação do composto sílica-polímero (Carvalho, 2017).	9
Figura 2.4: Representação da estrutura da borracha não vulcanizada e da estrutura da borracha vulcanizada (Gomes, 2008).....	10
Figura 2.5: Representação das etapas do processo produtivo da fábrica.	11
Figura 2.6: Misturação (a) dispersiva e (b) distributiva (adaptado (Feierabend , 2003)).	12
Figura 2.7: Impregnação do tecido têxtil na borracha (Moura, 2021).....	13
Figura 2.8: Representação do interior de uma extrusora do tipo parafuso (adaptado (Britto, 2015)).	13
Figura 2.9: Visão geral da etapa de misturação (adaptado (Pereira, 2021)).	15
Figura 2.10: Rotores do tipo Tangencial (Moribe, 2012).	16
Figura 2.11: Rotores do tipo <i>Intermeshing</i> (Moribe, 2012).	16
Figura 2.12: Esquema representativo do misturador (a) single e (b) Tandem (Pereira, 2021).	17
Figura 2.13: Representação gráfica da temperatura de mistura e da energia exercida pelo martelo em função do tempo de mistura (adaptado de (Feierabend, 2003)).	18
Figura 3.1: Diagrama de blocos generalizado para um sistema em ciclo fechado com uma estratégia de controlo de retroação (adaptado de (Kwong, 2013)).	20
Figura 3.2: Representação gráfica das diferentes respostas para os vários tipos de controladores, com a introdução da mesma perturbação (Coughanowr & Koppel, 1965).	23
Figura 3.3: Representação gráfica relativa à influência dos parâmetros do controlador: (a) influência do ganho proporcional, K_p (b) influência do tempo integral, τ_i (c) influência do tempo derivativo, τ_D (Gomes, 2011).	24
Figura 4.1: Diagrama de blocos para o sistema de controlo implementado.	30
Figura 4.2: Representação gráfica das curvas de temperatura da carga (vermelho), velocidade dos rotores (laranja) e elevação do martelo pneumático (azul) em função do tempo da misturação (Gomes, 2011).	31
Figura 4.3: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador em função do tempo para os seguintes perfis: (a) $K_p=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s (b) $K_p=3$; $\tau_i=2$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; e da velocidade dos rotores em função do tempo:(d) $K_p=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (e) $K_p=3$; $\tau_i=2$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s.....	34
Figura 4.4: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente:(a) e (e) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (f) $K_p=16$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (c) e (g) $K_p=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (d) e (h) $K_p=26$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s.	38
Figura 4.5: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis,	

respetivamente: (a) e (e) $K_P=21$; $\tau_i=3,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (f) $K_P=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (c) e (g) $K_P=21$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s; (d) e (h) $K_P=21$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s. 42

Figura 4.6: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (f) $K_P=31$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s; (c) e (g) $K_P=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s; (d) e (h) $K_P=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s. 46

Figura 4.7: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s; (b) e (f) $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,300$ s; (c) e (g) $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,375$ s; (d) e (h) $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,450$ s. 49

Figura 4.8: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_P=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s; (b) e (f) $K_P=30$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s; (c) e (g) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s; (d) e (h) $K_P=28$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s. 53

Figura 4.9: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 57

Figura 4.10: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 58

Figura 4.11: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 59

Figura 4.12: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 60

Figura 4.13: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo de plateau para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 62

Figura 4.14: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 63

Figura D.1: Representações gráficas relativas ao efeito do tempo integral na temperatura para os seguintes perfis: (a) $K_P=16$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (b) $K_P=17$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=18$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (d) $K_P=19$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s; (e) $K_P=20$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s. 94

Figura D.2: Representações gráficas da variação da velocidade dos rotores para os seguintes perfis: (a) $K_P=16$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (b) $K_P=17$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=18$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (d) $K_P=19$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s; (e) $K_P=20$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s. 95

Figura F.1: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador em função do tempo para os seguintes perfis: (a) $K_P=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s (b) $K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s (d) $K_P=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s. 119

Figura F.2: Representações gráficas da variação da velocidade dos rotores para os seguintes perfis: (a) $K_P=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s (b) $K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s (d) $K_P=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s. 120

Figura G.1: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente:(a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 121

Figura G.2: Representações gráficas obtidas no passo B2 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente:(a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 122

Figura G.3: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente:(a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 123

Figura G.4: Representações gráficas obtidas no passo B2 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente:(a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. 124

Figura H.1: Representação gráfica das curvas de temperatura (azul), velocidade dos rotores (rosa), energia envolvida no processo (verde) e elevações do martelo (vermelho) em função do tempo de *plateau* para o perfil: $K_P=11$; $\tau_i=2,5$; $\tau_D=0$ 125

Figura H.2: Representação gráfica das curvas de temperatura (azul), velocidade dos rotores (rosa), energia envolvida no processo (verde) e elevações do martelo (vermelho) em função do tempo de *plateau* para o perfil: $K_P=28$; $\tau_i=1$; $\tau_D=0,225$ 126

Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Exemplos de auxiliares de processamento com as respetivas funções (DIP-materiais, 2018).	9
Tabela 4.1. Registo dos valores dos parâmetros do controlador PID para cada perfil existente na empresa.	32
Tabela 4.2. Condições de realização das primeiras cargas.....	33
Tabela 4.3. Cargas realizadas e respetivas condições de realização do primeiro conjunto de testes.	36
Tabela 4.4. Registo dos valores dos parâmetros de caraterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e <i>overshoot</i> para cada perfil testado.....	40
Tabela 4.5. Cargas realizadas e respetivas condições de realização do segundo conjunto de testes.	41
Tabela 4.6. Registo dos valores dos parâmetros de caraterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e <i>overshoot</i> , para os diferentes perfis em teste.	43
Tabela 4.7. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para uma série de testes de ajuste do ganho proporcional.....	44
Tabela 4.8. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para uma série de testes de ajuste aos parâmetros proporcional e integral.	45
Tabela 4.9. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para o terceiro conjunto de testes.....	48
Tabela 4.10. Registo de valores dos parâmetros de caraterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e <i>overshoot</i> para os diferentes perfis.....	50
Tabela 4.11. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para os testes de ajuste final dos parâmetros do controlador.....	51
Tabela 4.12. Registo de valores dos parâmetros de caraterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e <i>overshoot</i> para os diferentes perfis.....	54
Tabela 4.13. Compostos testados com o perfil 2 e o perfil 28, após a alteração dos parâmetros do controlador e respetivas condições.	56
Tabela A.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada, com perfil 1 ($K_P=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 30 segundos de <i>plateau</i> . .	71
Tabela A.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada, com perfil 2 ($K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 30 segundos de <i>plateau</i> .72	72
Tabela A.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada, com perfil 3 ($K_P=3$; $\tau_i=2$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 30 segundos de <i>plateau</i>	73
Tabela A.4. Registo dos valores de dois parâmetros de caraterização de resposta: tempo de subida e <i>overshoot</i> , para cada perfil testado.	73
Tabela B.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 2 ($K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> . 75	75
Tabela B.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 4 ($K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> . 76	76
Tabela B.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 5, ($K_P=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .77	77
Tabela B.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 6 ($K_P=26$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> . 79	79

Tabela C.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 7 (KP=21; $\tau_i=3,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	81
Tabela C.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 5 (KP=21; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	82
Tabela C.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade de rotores de cada carga realizada com perfil 8 (KP=21; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	83
Tabela C.4. Registo dos valores de temperatura de cada carga realizada com perfil 9 (KP=21; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	85

Tabela D.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade do rotores de cada carga realizada com perfil 10 (KP=16; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	87
Tabela D.2. Registo dos valores de temperatura de cada carga realizada com perfil 11 (KP=17; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	88
Tabela D.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 12 (KP=18; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	90
Tabela D.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 13 (KP=19; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	91
Tabela D.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 14 (KP=20; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	92
Tabela D.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 15 (KP=26; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	96
Tabela D.7. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 16 (KP=31; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	97
Tabela D.8. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 17 (KP=26; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	98
Tabela D.9. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 18 (KP=31; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	100

Tabela E.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 19 (KP=26; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	103
Tabela E.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 20 (KP=26; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,300$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	104
Tabela E.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 21 (KP=31; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,375$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	105
Tabela E.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 22 (KP=31; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,450$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	107

Tabela F.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 23 (KP=26; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	109
Tabela F.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 24 (KP=30; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i>	110

Tabela F.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 25 ($KP=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	111
Tabela F.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 26 ($KP=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	113
Tabela F.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 27 ($KP=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	114
Tabela F.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 28 ($KP=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	115
Tabela F.7. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 29 ($KP=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	117
Tabela F.8. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 30 ($KP=28$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de <i>plateau</i> .	118

NOMENCLATURA

DIP	Departamento de Industrialização do Produto
KM	<i>Karkasse Machine</i>
MMS	<i>Mixing Management System</i>
NR	Borrachas naturais
P	Controlador Proporcional
PD	Controlador Proporcional Derivativo
PI	Controlador Proporcional Integral
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PU	<i>Production Unit</i>
Ram	<i>Ram Lift</i>
Rpm	Rotações Por Minuto
SR	Borrachas sintéticas
K_p	Ganho Proporcional
τ_D	Tempo Derivativo
τ_i	Tempo Integral

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Objetivos de Trabalho

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio que se integra no último ano do Mestrado em Engenharia Química, Ramo de Energia e Biorrefinaria do Instituto Superior de Engenharia do Porto, e que permite ao aluno aplicar, de forma integrada, múltiplos conceitos adquiridos ao longo do curso num contexto real de trabalho. A empresa escolhida para a realização deste estágio foi a Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A, que se localiza em Vila Nova de Famalicão e é especializada na produção de pneus.

O estágio, com duração de 5 meses (cinco dias por semana e aproximadamente oito horas diárias), decorreu de forma presencial no Departamento de Industrialização do Produto da Empresa.

O pneu é um compósito estrutural que contém vários componentes e conta com um elevado número de matérias-primas. Atualmente, existem pneus específicos e, portanto, a sua constituição e a sua composição vão sofrendo alterações consoante as propriedades finais mais adequadas, para ser possível um bom desempenho do pneu (Carvalho, 2017).

O processo para a obtenção do pneu pode ser dividido em cinco grandes etapas essenciais, são elas, a misturação, a preparação, a construção, a vulcanização e a inspeção final.

No âmbito da dissertação “Otimização do controlo da temperatura no processo de mistura de compostos de borracha” é importante salientar a etapa da misturação. É nesta etapa que ocorre a reação de silanização dos compostos de borracha com a sílica, sendo que, esta reação deve ser realizada em determinadas condições, e, portanto, torna-se essencial controlar a temperatura de silanização usando um controlador proporcional integral derivativo (PID).

Assim, esta dissertação apresenta como principal objetivo a otimização dos parâmetros do controlador, ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo, implementado na empresa, de forma a ser possível reduzir a amplitude da variação da temperatura no processo e, por consequência, melhorar o controlo da temperatura da reação na etapa da misturação.

Para tal, numa primeira fase do trabalho foi pertinente conhecer o processo produtivo da unidade fabril, em especial aprofundar conhecimentos relativos à etapa de misturação. Numa segunda fase, antes de se iniciar qualquer tipo de teste, foi essencial abordar e aprofundar conceitos relativos ao controlo de processos. Seguidamente foi necessário realizar um levantamento de todos os parâmetros e variáveis do sistema, na situação atual, de modo a ser possível obter um conhecimento prévio relativo a todo o processo. Numa outra fase do trabalho, procedeu-se à realização de testes com diferentes combinações dos parâmetros do controlador PID em produções usando diferentes compostos, de modo a melhorar o controlo da temperatura da reação e, consequentemente, permitir a melhoria das propriedades físicas e viscoelásticas do composto.

1.2 Apresentação da Empresa

A empresa Continental foi fundada em outubro de 1871 em Hanôver, na Alemanha. Nesse ano, a produção principal da fábrica incluía produtos de borracha suave, tecidos revestidos de borrachas e pneus maciços para as carruagens e bicicletas. Em 1904, a empresa apresenta o primeiro pneumático para automóveis com um padrão de piso. Entre os anos de 1935 e 1960, os veículos equipados com pneus Continental ganham diversas provas internacionais. Já de 1961 a 1990, as áreas de negócio expandem-se na Europa e nos Estados Unidos com aquisição de empresas e acordos de parceria.

Mais tarde, por volta de 2007, a Continental torna-se um dos cinco maiores fornecedores mundiais da indústria automóvel, e por esse motivo divide-se em cinco grandes áreas, nomeadamente (Continental AG, 2021):

- Chassis e segurança;
- Habitáculo;
- Transmissão;
- *Conti Tech*;
- Pneus.

O Grupo Continental pode assim assumir que ajuda as pessoas em todo o mundo a concretizar as ideias de mobilidade, uma vez que, disponibiliza soluções que ajudam os clientes a sentir-se mais seguros e proporcionam mais oportunidades para moldar o futuro dos seus compradores, como fornecedor da indústria automóvel e parceiro industrial (Continental AG, 2021).

Em Portugal, a primeira fábrica de pneumáticos foi a Mabor- Manufatura Nacional de Borracha, S.A., de onde o primeiro pneu de automóvel saiu em abril de 1946. Nos anos 50, a Mabor detinha o monopólio, como única empresa produtora de pneus em Portugal. Em 1990, acontece a união da Mabor e da Continental AG, surgindo em Lousado a Continental Mabor- Indústria de Pneus, S.A. (Continental AG, 2021).

Na data da sua fundação, apenas existiam pneus da marca Mabor em Portugal, com uma produção média diária de 5 000 pneus/ dia. No entanto, atualmente, a produção média diária da Continental Mabor é de 56 000 pneus/ dia, existindo uma vasta gama de pneus, quer ao nível de medidas, quer ao nível de marcas, sendo que, na empresa mais de 98% da produção destina-se a exportações. Por este motivo, a Continental Mabor obteve um grande reconhecimento e crescimento económico, sendo considerada uma das fábricas com melhores índices de produtividade (Continental AG, 2021; Brito, 2011).

Esta empresa produz pneus que são direcionados para diversas empresas de veículos conceituados na indústria automóvel, tais como, a Mercedes-Benz, a BMW e a Volkswagen, e para o mercado de substituição, onde os pneus são enviados para revendedores de pneus (Vieira, 2020).

Na Figura 1.1 é possível observar a extensa área das instalações da Continental Mabor, onde, hoje em dia, contabiliza-se cerca de 2564 colaboradores.



Figura 1.1: Área das instalações da Continental Mabor (Vieira, 2020).

Atualmente, a Continental Mabor está dividida em 13 departamentos, sendo de destacar o Departamento de Industrialização do Produto (DIP) e de Produção, dada a sua importância para a execução da presente dissertação.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos e em seguida descreve-se o conteúdo de cada um destes.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do trabalho, com referência ao tema e aos principais objetivos, uma breve apresentação histórica da empresa, e ainda a organização da presente dissertação.

O capítulo dois é referente à contextualização da presente dissertação, começando por expor quais os principais componentes para a formação do pneu e quais as matérias-primas utilizadas no processo de fabrico. De seguida, é realizada uma descrição sucinta das etapas do processo de fabrico, dando uma maior relevância à etapa de mistura, que é explicada com maior detalhe.

O terceiro capítulo aborda o controlo de processos, onde se apresentam os diferentes tipos de controladores e ainda são mencionados alguns dos métodos de sintonização existentes.

De seguida, o capítulo quatro diz respeito a todo o trabalho experimental e respetiva análise de resultados. Este capítulo, inicia-se com a exposição do problema proposto pelo Departamento de Industrialização do Produto e com a descrição das condições atuais da situação de um dos controladores da empresa. Seguidamente, é realizada uma análise aos testes práticos com o objetivo de descobrir uma combinação de valores dos parâmetros de controlo satisfatória e, finalmente, após escolhida a combinação, apresenta-se outra análise com o intuito de validar esta mesma escolha.

O quinto capítulo trata-se da conclusão da presente dissertação, onde se apresenta as principais conclusões retiradas do trabalho experimental efetuado e, para além disso, referem-se as possíveis sugestões de futuros trabalhos.

2 Processo de Fabrico do Pneu

Neste capítulo, procede-se a uma breve descrição do produto final da empresa, que contrariamente ao que aparenta é bastante complexo, tornando-se essencial descrever todos os componentes que constituem este produto, assim como as matérias-primas utilizadas durante todo o processo. Além disso, é ainda apresentada uma descrição do processo produtivo da empresa, desde a receção das matérias-primas até ao processo de expedição do produto acabado, onde é dada uma maior relevância à etapa da misturação.

2.1 Pneu e a sua Estrutura

O pneu de um automóvel é um compósito estrutural que contém vários componentes e, ainda um elevado número de matérias-primas. Hoje em dia, existem pneus específicos para cada tipo de veículo e até para as diferentes estações do ano, devido as condições adversas dos pisos. Portanto, a sua constituição e a sua composição vão sofrer alterações consoante as propriedades finais mais adequadas, para ser possível um bom desempenho do pneu (Carvalho, 2017).

Contrariamente ao que aparenta, os pneus são produtos de engenharia bastante complexos, e são constituídos por cerca de 10 componentes. Na Figura 2.1 apresenta-se o pneu com todos os seus componentes devidamente numerados.

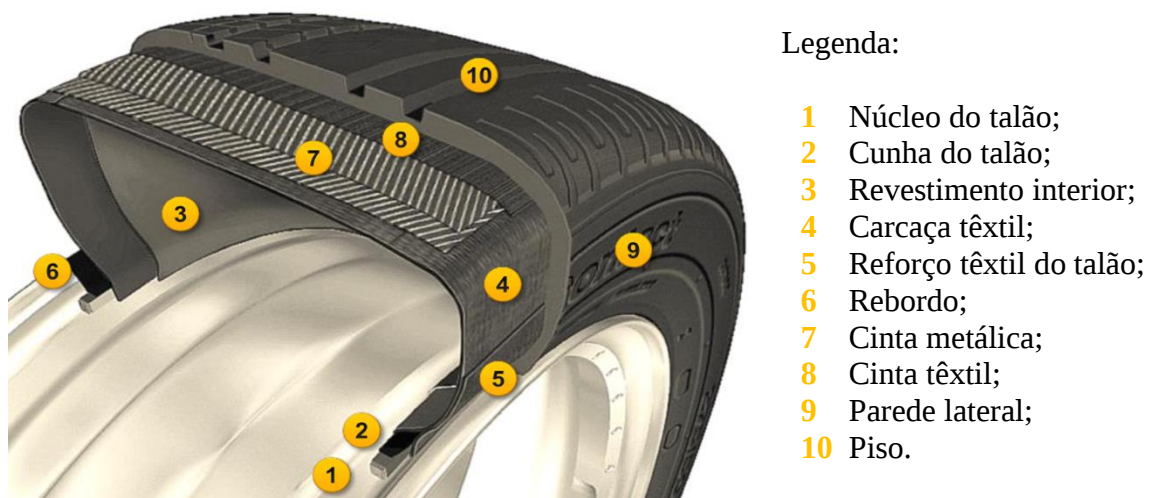


Figura 2.1: Representação dos principais componentes que constituem um pneu (Continental AG, 2018).

Os componentes presentes no pneu desempenham todos uma determinada função fundamental e podem variar consoante as características pretendidas ou exigidas pelos clientes.

De acordo com a Figura 2.1, é possível observar que o talão se divide em 3 porções, sendo estas, o núcleo, a cunha e o reforço. O núcleo é um monofilamento feito em fios de aço cobertos de borracha, que tem como objetivo manter o pneu firme à jante, transmitir as forças longitudinais de aceleração, travagem e efetuar a permeabilidade do pneu. A cunha do talão influencia a precisão da direção e a estabilidade direcional e é constituída por borracha sintética. Por fim, pode ainda ser adicionado o reforço, que tem uma função

idêntica à cunha do talão, composto por cordões de rayon, nylon ou poliéster incorporados numa matriz de borracha (Continental AG, 2018).

Na parte central do pneu, é possível encontrar o revestimento interior e a carcaça têxtil. O primeiro componente é feito de borracha butílica e tem com função vedar o interior do pneu, uma vez que está cheio de ar comprimido. Já o segundo componente é composto por cordões multifilamento de rayon ou poliéster numa matriz de borracha e, apresenta como principal função o suporte da carga (Continental AG, 2018).

De seguida, é possível encontrar o rebordo que funciona como um protetor de jante, uma vez que reforça a ligação do pneu com a jante, sendo este constituído maioritariamente por borracha sintética (Continental AG, 2018).

Quanto à cinta metálica, esta é constituída por cordões de aço de elevada resistência entrelaçados entre si, numa matriz de borracha, apresentando como principais funções a rigidez circunferencial e transversal, de modo a estabilizar a forma do pneu e assegurar estabilidade direcional e a flexibilidade vertical, com objetivo de se deformarem sob a presença de um obstáculo. Por cima desta cinta, é possível encontrar uma cinta têxtil composta por uma tira de borracha revestida por cordões de nylon e tem com função melhorar a manobrabilidade a elevadas temperaturas (Continental AG, 2018).

Por fim, na parte exterior do pneu, encontra-se a parede lateral e o piso, ambos constituídos por uma mistura de borrachas, borracha natural e borracha sintética, produzidos através do processo de extrusão. A parede lateral tem com função proteger o invólucro contra choques laterais e contra condições atmosféricas adversas, enquanto que o piso, é o componente que entra em contacto com o solo e influencia o desgaste, a aderência e a resistência ao rolamento (Continental AG, 2018).

2.2 Matérias Primas que constituem o Pneu

O pneu composto possui características que, de certo modo, podem ser únicas, visto que podem existir propriedades que não se encontram noutros materiais, como propriedades de amortecimento, alta elasticidade e resistência à abrasão. Como referido anteriormente, os pneus são constituídos por dez componentes, onde são utilizadas diferentes matérias-primas, consoante o pneu que se pretende obter (Erman, Mark, & Roland, 2013).

Na Figura 2.2, encontra-se um esquema representativo dos principais grupos de matérias-primas utilizadas, em geral, numa receita para a produção de compostos de borracha. Seguidamente, e de forma sucinta, será explicado o papel de cada matéria-prima nos componentes do pneu.

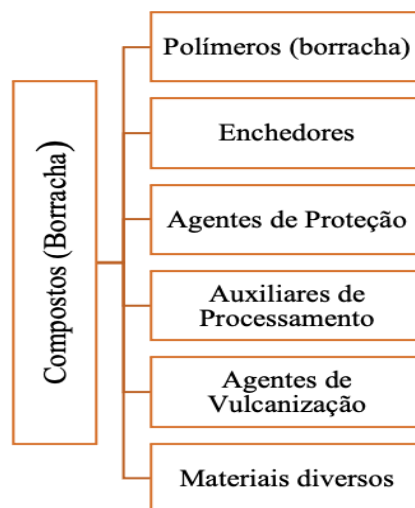


Figura 2.2: Principais grupos de matérias-primas utilizadas no processo de fabrico do pneu (adaptado de (DIP-materiais, 2018)).

2.2.1 Polímeros

A borracha é a matéria-prima base do pneu, e trata-se de um elastómero com longas cadeias de polímeros, flexíveis às temperaturas utilizadas e com uma elevada capacidade para sofrer grandes deformações elásticas, isto é, esticar e voltar ao seu formato original de uma forma reversível (Erman, Mark, & Roland, 2013; DIP-materiais, 2018).

Dentro do grupo de matérias-primas dos polímeros são utilizadas, maioritariamente, as borrachas naturais (NR) e as borrachas sintéticas (SR). No entanto, é comum utilizar-se uma mistura de polímeros, em quantidades definidas, consoante o composto que se pretende produzir (DIP-materiais, 2018).

A borracha de isopreno, vulgarmente conhecida como borracha natural, é proveniente da seiva da árvore *Hevea Brasiliensis*, cuja estrutura química polimérica é constituída por monómeros de isopreno ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$), possuindo como principais propriedades uma elevada resistência à fadiga, uma elevada elasticidade e uma baixa reversão das ligações a elevadas temperaturas (DIP-materiais, 2018).

Através da polimerização de monómeros são então produzidas as borrachas sintéticas obtendo-se vários tipos, sendo que, as mais utilizadas na indústria de pneus são a borracha sintética de isopreno, a borracha de estireno butadieno, a borracha de polibutadieno e a borracha de isobutileno isopreno (DIP-materiais, 2018).

As borrachas sintéticas de isopreno são produzidas artificialmente e representam uma réplica direta da borracha natural, apresentando por isso as mesmas propriedades (DIP-materiais, 2018).

As borrachas de estireno butadieno produzem diferentes tipos de borrachas consoante a técnica de polimerização utilizadas. Estas possuem uma estrutura polimérica constituída por monómeros de estireno ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{C}_6\text{H}_5)$) e butadieno ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$) proporcionando uma elevada resistência ao corte, elevada travagem em seco e em molhado e uma baixa resistência ao rolamento e ao desgaste (DIP-materiais, 2018).

Existem também diferentes tipos de borrachas de polibutadieno, estrutura polimérica constituída por monómeros de butadieno ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$), dependendo do tipo de catalisador utilizado na polimerização. Estas borrachas apresentam algumas características desejáveis, tais como, uma elevada resistência à abrasão, ao início dos cortes e às fissuras, elevada flexibilidade a baixas temperaturas, entre outras (DIP-materiais, 2018).

Por fim, as borrachas de isobutileno isopreno compostas por uma estrutura química polimérica com monómeros de isobutileno ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)_2$) e pequenas porções de isopreno ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$) (DIP-materiais, 2018).

2.2.2 Enchedores

Tal como os polímeros, também as cargas ou enchedores são das matérias-primas mais importantes na composição da borracha. No entanto, estes devem ser utilizados com devido cuidado pois, geralmente, o aumento do volume de um determinado enchedor faz aumentar a viscosidade dos compostos, dado que, estas duas variáveis são diretamente proporcionais. Assim, a utilização excessiva deste tipo de matéria prima pode provocar alguns problemas de produção (Caetano, 2010).

Os enchedores são necessários para reforçar os compostos e estão divididos em enchedores de reforço e não reforço. Os principais enchedores de reforço utilizados na indústria são o negro de fumo e a sílica, e têm como função a redução da viscosidade do polímero durante a mistura e a melhoria da performance do composto na etapa de preparação. Os enchedores de não reforço têm como objetivo a redução do custo do material, a melhoria das propriedades de estanquicidade ao ar e a melhoria do aspeto visual e das características da mistura, sendo exemplos de enchedores de não reforço o caulino, o carbonato de cálcio, o talco e a borracha reciclada (DIP-materiais, 2018).

O negro de fumo é um agente reforçante sendo também responsável pela cor do pneu, uma vez que é constituído essencialmente por partículas extremamente pequenas de carbono. A capacidade de reforço deste material é obtida através da interligação do negro de fumo com a matriz polimérica através de ligações de Van der Waals (Rodrigues, 2016; DIP-materiais, 2018).

A sílica ou dióxido de silício é um composto químico cujas partículas apresentam pequenas dimensões e tem uma influência significativa nas características finais do produto. Este apresenta uma polaridade semelhante à do polímero, e por consequência a capacidade de ligação entre a borracha e a sílica torna-se bastante mais reduzida, o que irá tornar o processo de mistura bem mais difícil, sendo, por isso, necessário arranjar uma solução. A solução passa por um agente ativador de ligação, designado de silano, visto que este provoca a diminuição da polaridade da sílica e consequentemente, aumenta a facilidade de ligação sílica-polímero (Evonik, 2021; DIP-materiais, 2018).

A estrutura do silano não só permite uma melhor dispersão da sílica, uma mistura mais fácil e um processamento mais rápido e flexível, mas também permite ter duas funcionalidades essenciais, sendo assim considerado bifuncional. Primeiramente um dos lados da molécula reage com a superfície da sílica, ocorrendo a estabilização da reação de silanização, durante o processo de mistura. No entanto, o outro lado da molécula de silano reage com o polímero e assegura a reação de reticulação na etapa de vulcanização.

De um modo geral, a reação de silanização consiste em alterar a superfície de sílica através de um ativador, silano, formando, através de ligações covalentes, o composto sílica-polímero, com a libertação de duas moléculas de etanol, como se observa na Figura 2.3 (Momentive, 2013; Feierabend, 2003; Pinheiro, 2015).

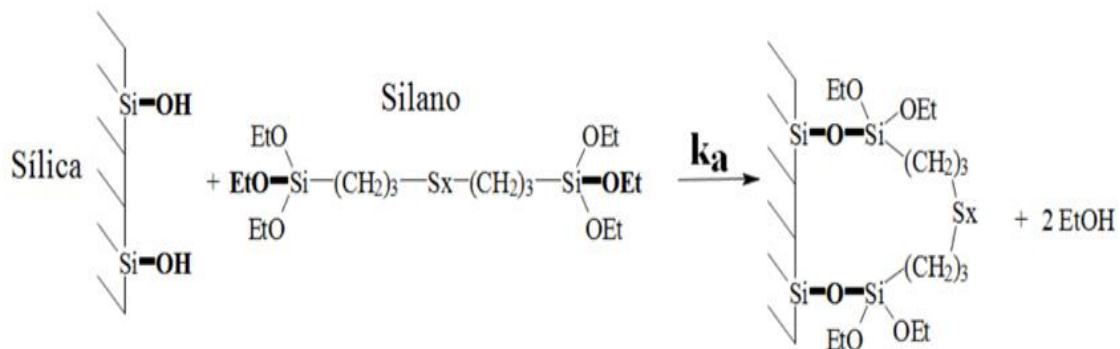


Figura 2.3: Reação de silanização para formação do composto sílica-polímero (Carvalho, 2017).

De notar que, é fundamental conseguir realizar a reação de silanização a uma temperatura constante, definida antecipadamente pelo DIP, visto que só atingindo esta temperatura especificada é que se pode garantir a ocorrência da reação. Por outro lado, a temperatura também não deve ser superior ao recomendado pois, neste caso, ocorre a ligação do silano ao polímero, o que pode levar à vulcanização prematura.

2.2.3 Agentes de Proteção

Os agentes de proteção apresentam como principais objetivos o fornecimento da proteção química ou a criação de uma barreira física contra o ataque químico do meio ambiente ao produto (DIP-materiais, 2018).

Existem diferentes tipos de agentes de proteção com distintas funções, sendo eles, os antioxidantes, que protegem contra o envelhecimento, os antiozonantes, que protegem a parte externa do pneu contra-ataque do ozono e as ceras de proteção que fornecem uma proteção estática ao pneu. De salientar que, as ceras de proteção são também utilizadas para garantir a proteção do pneu contra o ozono, quando este se encontra no armazém (DIP-materiais, 2018; Pinheiro, 2015).

2.2.4 Auxiliares de Processamento

Geralmente, adiciona-se os auxiliares de processamento com o objetivo de melhorar as características do processo, sem alterar as propriedades físicas dos constituintes, de forma significativa. São exemplos destes auxiliares os óleos amaciadores, os ácidos gordos, os promotores de adesividade, os plastificantes, podendo observar-se na Tabela 2.1 as suas respectivas funções.

Tabela 2.1. Exemplos de auxiliares de processamento com as respectivas funções (DIP-materiais, 2018).

Tipo	Função
Óleos amaciadores	Melhora a dispersão de cargas durante a mistura; Evita a acumulação excessiva na mistura.
Ácidos gordos	Evita a aderência da borracha quente às peças metálicas; Reduz a viscosidade do composto
Promotores de adesividade	Controla o nível de aderência da borracha processada.
Plastificantes	Quebra química das cadeias de polímero para reduzir viscosidade; Melhora o fluxo de extrusão; Melhora a libertação do pneu do molde.

2.2.5 Agentes de Vulcanização

A vulcanização consiste num processo de reticulação, onde a estrutura química da matriz polimérica é convertida numa rede elástica tridimensional, por meio de ligações químicas cruzadas, como se observa na Figura 2.4. O principal objetivo deste processo passa por conferir, restabelecer ou melhorar as propriedades elásticas da borracha numa gama alargada de temperaturas (Gomes, 2008).

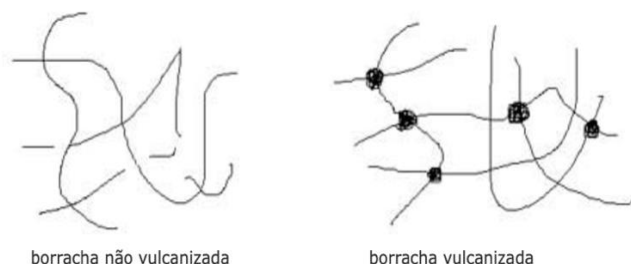


Figura 2.4: Representação da estrutura da borracha não vulcanizada e da estrutura da borracha vulcanizada (Gomes, 2008).

No processo de vulcanização são utilizados agentes de vulcanização, ativadores, retardadores, aceleradores, com o intuito de produzir as características de vulcanização desejadas e obter as propriedades pretendidas do vulcanizado (Gomes, 2008).

De todos os agentes de vulcanização, o mais utilizado é o enxofre, visto que com este, o produto final pode ser obtido a um menor custo, permite uma maior flexibilidade na composição do produto final, uma melhoria nas propriedades mecânicas e, ainda apresenta a possibilidade de vulcanizar através de ar quente. Este agente de vulcanização vai reagir com as ligações duplas da borracha, formando-se as reticulações (Gomes, 2008).

A reação de vulcanização, utilizando apenas, como promotor da reação, o enxofre, é demasiado lenta e, por isso, necessita de grandes períodos de vulcanização. Por consequência, obtém-se uma baixa eficiência de reticulação, sendo assim, necessário utilizar os aceleradores de reação que permitem controlar o tempo e/ou temperatura requerida (Gomes, 2008).

De um modo geral, todos os compostos têm ativadores, pois são substâncias que atuam com os aceleradores e aumentam o seu efeito, tornando a mistura mais solúvel. Por outro lado, o uso de retardadores é mais ocasional, visto que, estes são apenas adicionados para prevenir uma pré-vulcanização, nas condições de processamento do composto (Gomes, 2008).

2.3 Processo Produtivo

O processo de produção da unidade fabril pode ser dividido em cinco grandes etapas essenciais, sendo que cada departamento da fábrica é responsável por uma etapa do processo. Na Figura 2.5 encontram-se as cinco etapas essenciais que serão explicadas seguidamente, de uma forma sucinta (Catim, 2021).



Figura 2.5: Representação das etapas do processo produtivo da fábrica.

Inicialmente ocorre o armazenamento de todas as matérias-primas que é feito num local específico e com todas as condições necessárias ao armazenamento de produtos químicos. Para além disso, estas matérias-primas são submetidas a processos de controlo de qualidade e, só após uma aprovação é que as mesmas podem ser utilizadas na primeira etapa do processo produtivo (Continental AG, 2018; Vinhas, 2016).

2.3.1 Misturação

A misturação corresponde à primeira etapa do processo produtivo tendo 3 funções essenciais, a incorporação, a dispersão e a homogeneização. A incorporação tem como objetivo agregar à massa de borracha todas as matérias primas, quer sejam líquidas ou sólidas. A dispersão é referente à dispersão de todas as partículas sólidas que constituem as cargas na matriz polimérica, onde ocorre a alteração do tamanho e forma das partículas. Por fim, ocorre a homogeneização de toda a massa, isto quer dizer, a distribuição de todos os componentes de maneira uniforme em toda a matriz, sem alteração da forma e do tamanho das partículas. De notar que, qualquer que seja a operação de misturação existem sempre dois tipos de mistura, a distributiva e a dispersiva, como se observa na Figura 2.6. (Caetano, 2010; Feierabend, 2003).

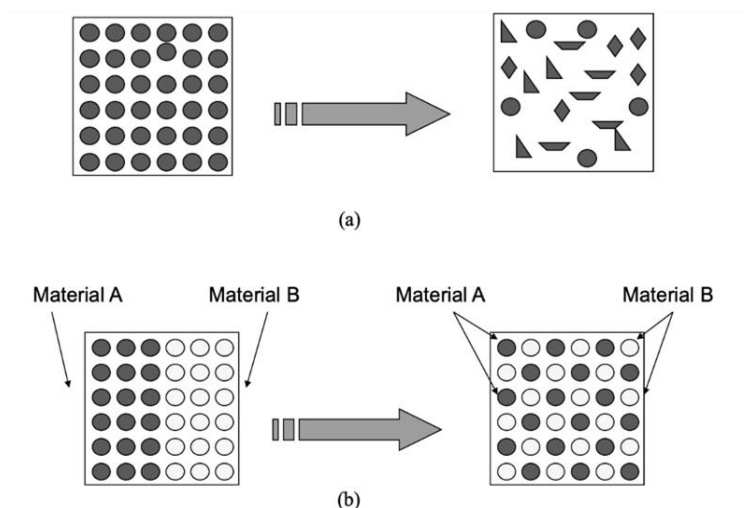


Figura 2.6: Misturação (a) dispersiva e (b) distributiva (adaptado (Feierabend , 2003)).

Inicialmente, nesta etapa, procede-se à pesagem e medição de matérias-primas específicas, de acordo com uma receita. Seguidamente, é tudo misturado em misturadores que podem conter uma ou duas câmaras de misturação (Catim, 2021).

Pelo facto de as temperaturas de misturação serem altas e para que não ocorra uma vulcanização prematura, torna-se impossível a adição inicial de agentes de vulcanização, como é o caso do enxofre. Por consequência, é necessário dividir a etapa de misturação em duas fases. A primeira ocorre em misturadores *masters*, que tem como função a produção de uma borracha intermédia, onde a carga entra no processo é carregada e pressurizada para o interior dos rotores, através da pressão do martelo pneumático, sendo de seguida, descarregada numa porta inferior. A segunda fase de misturação, realiza-se a uma temperatura inferior para impedir que ocorra a pré-vulcanização. Nesta fase adiciona-se a borracha intermédia, os agentes de vulcanização e ainda as resinas termoendurecíveis em misturadores “Finais”, que têm como objetivo a formação do composto “final” que, será posteriormente, armazenado em “mesas” de borracha (Vinhas, 2016; Moura, 2021).

Esta etapa da misturação torna-se fundamental para o sucesso de todo o processo produtivo, uma vez que, o sucesso das seguintes etapas depende, em grande parte, de uma boa mistura. No subcapítulo 2.4, esta etapa será explicada com mais detalhe.

2.3.2 Preparação

A preparação é a segunda etapa do processo que tem como objetivo a geração de todos os componentes que constituem o pneu, referidos no subcapítulo 2.1. Por norma, na preparação os compostos podem sofrer dois processamentos diferentes dependendo do componente do pneu que se pretende produzir, sendo estes, a calandragem ou a extrusão (Carvalho, 2017).

Ao nível das matérias-primas, os equipamentos são alimentados pelas “mesas” de borracha obtidas na etapa de misturação, identificadas com as diferentes combinações de compostos. Além das “mesas de borracha”, são utilizadas outro tipo de matérias-primas, como o tecido, o arame e o metal.

O processo de calandragem consiste em pressionar a borracha entre dois ou mais rolos para formar folhas finas e planas, sendo que, a espessura destas folhas é controlada consoante as características que se pretende obter. Para além disso, a calandragem é bastante utilizada para a impregnação do tecido têxtil ou metálico na borracha, como se observa na Figura 2.7, sendo assim possível produzir as cintas têxteis e metálicas (Carvalho, 2017).



Figura 2.7: Impregnação do tecido têxtil na borracha (Moura, 2021).

Por outro lado, para o processamento dos compostos de borracha utiliza-se uma extrusora do tipo parafuso, como apresentado na Figura 2.8, e é utilizado na produção dos pisos, paredes e cunhas de talão. Este processo inicia-se quando as “mesas” de borracha são colocadas nas extrusoras, onde existe um rolo que vai pressionando os compostos contra o parafuso. Quando estes entram em contacto com o sem-fim, vão sendo empurrados, mas também homogeneizados e aquecidos, visto que no interior do sem-fim existem uns pinos, com elevada espessura, que conseguem tocar na borracha que está a ser empurrada, até passar pela fieira e adquirir o formato final, o extrudido (Sousa, 2011).

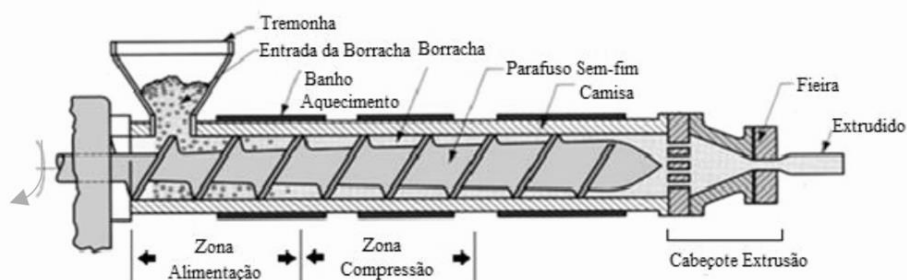


Figura 2.8: Representação do interior de uma extrusora do tipo parafuso (adaptado (Britto, 2015)).

Finalmente, na calandra ou na extrusora procede-se ao corte dos constituintes do pneu nas dimensões adequadas. Depois de produzido cada componente que constitui o pneu, são armazenados (armazenamento automático) nos devidos lugares, para que, numa próxima fase, possa ser então construído o pneu (Catim, 2021).

2.3.3 Construção

A construção é responsável pela construção do “pneu cru” ou “pneu em verde”. Nesta terceira etapa, é feita uma divisão onde os constituintes são montados em dois equipamentos, a KM (Karkasse Maschine) e a PU (Production Unit) (Vinhas, 2016).

Inicialmente, na KM, constrói-se a carcaça do pneu que é composta pelo revestimento interno, pelos talões, pelas telas têxteis e pelas paredes laterais. Após a construção da carcaça, procede-se à segunda parte, onde se acrescenta as telas metálicas, as cintas têxteis em espiral e o piso. Esta montagem é realizada no equipamento PU, onde ocorre uma expansão do pneu na sua forma final (Vinhas, 2016; Catim, 2021).

2.3.4 Vulcanização

Após a construção dos “pneus em verde”, estes são dirigidos para cabines de pinturas onde são sujeitos a uma pintura no seu interior, com o objetivo de ficarem bem lubrificados e prolongarem assim o tempo de duração de um diafragma, isto é, aumentar a durabilidade de um dos constituintes da prensa de vulcanização (Vinhas, 2016).

Seguidamente, os “pneus em verde” são direcionados para as prensas, onde se procede à moldagem, por compressão, e à vulcanização em prensas de vapor, a elevadas temperaturas e durante cerca de 10/15 minutos. De notar que, a vulcanização corresponde a uma reação de reticulação, assim pela ação do calor e pela adição de um ativador de reação, altera-se a estrutura química da borracha, tornando-a elástica. Durante este tempo, o pneu adquire a sua forma final (Catim, 2021; Feierabend, 2003).

2.3.5 Inspeção Final

Na última etapa do processo produtivo, todos os pneus seguem para a inspeção através de transportadores automáticos, onde se avalia a qualidade do produto final acabado e se garante, através de ensaios necessários, que todos os requisitos de qualidade e segurança do pneu foram cumpridos. Depois de todas as especificações terem sido aprovadas no departamento de inspeção final, os pneus seguem para o armazém de produto acabado (Carvalho, 2017; Catim, 2021).

2.4 Etapa de Misturação

Como foi referido no subcapítulo 1.1, o presente trabalho foi desenvolvido na etapa de misturação e, por isso é agora realizada uma descrição mais detalhada desta etapa. Na Figura 2.9, é possível observar um diagrama com uma visão geral da etapa de misturação.

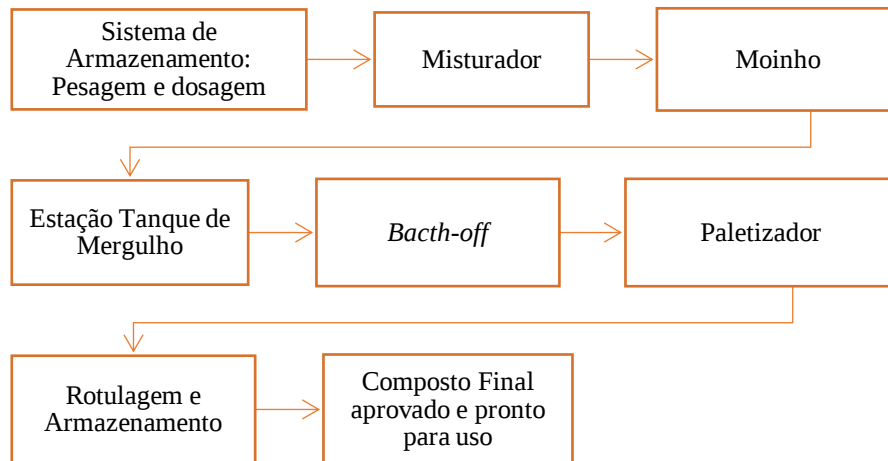


Figura 2.9: Visão geral da etapa de misturação (adaptado (Pereira, 2021)).

Tal como descrito na secção 2.3.1, a etapa de misturação inicia-se com a pesagem das matérias-primas armazenadas (em silos, sacos grandes e caixas) de acordo com uma dada receita. As pesagens ocorrem em diferentes linhas, visto que podem ser automáticas, como é o caso de negro de fumo e da sílica, que são armazenadas em silos e alimentam diretamente a câmara de misturação através de tubos; ou manuais, como por exemplo, os polímeros e alguns pigmentos que são cortados e pesados de acordo com o que a receita exige (Pereira, 2021).

Após todas as matérias-primas serem pesadas, estas seguem para o misturador. Os misturadores utilizados nesta etapa são do tipo *batch* e apresentam na sua constituição dois rotores a rodar em sentidos opostos dentro da câmara de misturação e um martelo pneumático. A descida do martelo comprime a carga sólida entre o martelo e os rotores, gerando elevadas forças de atrito e tensões de corte no composto aumentando, por isso, a sua temperatura (Moribe, 2012).

É importante salientar que, atualmente, na empresa existem dois tipos de rotores: Tangencial e *Intermeshing*. No tangencial, a ação de mistura existe apenas entre o rotor e as paredes internas da câmara, como se observa na Figura 2.10. O tempo de mistura é, por norma, curto, uma vez que, a distância entre os dois rotores é grande e a entrada de matéria-prima é geralmente rápida. No entanto, existem aumentos relativamente rápidos de temperatura durante a mistura do composto de borracha e, isto acontece devido à ação intensa dos rotores, sendo assim necessário uma gestão cuidadosa da temperatura da mistura (Moribe, 2012).

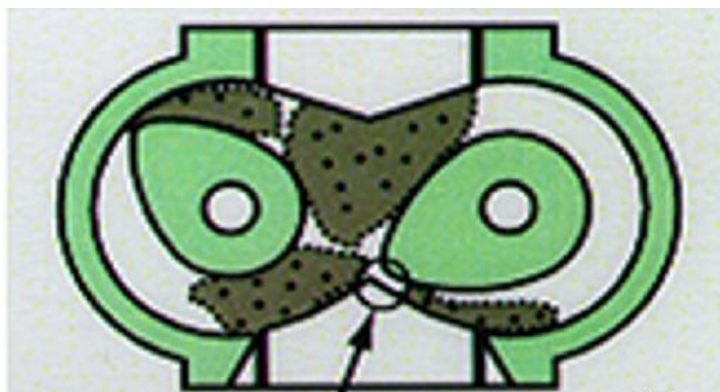


Figura 2.10: Rotores do tipo Tangencial (Moribe, 2012).

Por outro lado, no *Intermeshing* a ação considerada predominante de mistura ocorre entre os dois rotores, existindo também ação entre o rotor e as paredes internas, como se observa na Figura 2.11. Neste caso, a distância entre os rotores é mais pequena e, por isso, a entrada de matérias-primas é mais lenta, tornando o ciclo mais demorado (Feierabend, 2003).

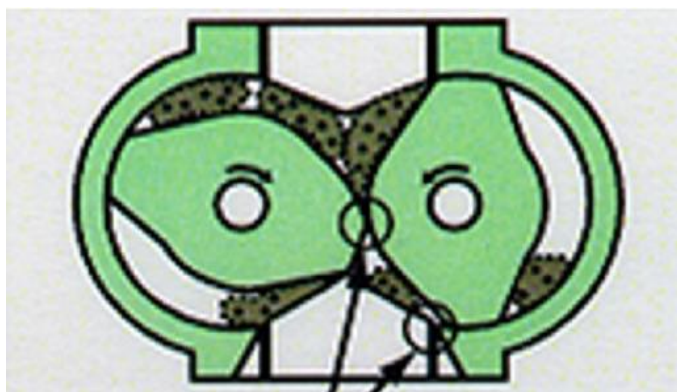


Figura 2.11: Rotores do tipo Intermeshing (Moribe, 2012).

De salientar que, os rotores do tipo *Intermeshing* apresentam excelentes desempenhos ao nível do arrefecimento e distribuição, sendo assim mais adequados para misturas de alta qualidade, para os vários tipos de borracha e para compostos sensíveis à temperatura. Estes são mais eficientes apresentando um maior custo de aquisição, no entanto, sendo a qualidade do pneu um critério essencial os rotores *intermeshing* são os mais utilizados pela empresa (Moribe, 2012; Feierabend, 2003).

Dependendo da receita e da finalidade do composto, este pode ser submetido a 4 tipos de mistura, a mastigação, o master *batch*, o *remill* e final *mix*. O master *batch* tem como objetivo a formação do composto intermédio através da incorporação, dispersão e homogeneização dos enchedores e óleos nos polímeros a elevadas tensões de corte e com temperaturas de descarga na ordem dos 150°C. A mastigação tem como objetivo a redução da viscosidade do polímero e o processo de *remill* reduz a viscosidade do composto. Por fim, como a temperatura no processo de master *batch* é demasiado elevada, realiza-se o final *mix* que produz o composto final através de um processo de mistura com temperaturas de descarga mais baixas e com a distribuição dos agentes de vulcanização no composto (Feierabend, 2003).

Geralmente, as matérias-primas passam por um processo de *master batch* e *final mix*, podendo ser realizados em misturadores *single* ou em misturadores *tandem*. A principal diferença entre estes dois tipos de misturadores é que no primeiro é realizado um processo de cada vez e, no segundo é possível realizar os dois processos em contínuo, visto que, estes tipos de misturadores possuem duas câmaras de misturação. Na Figura 2.12, observa-se a diferença entre os dois misturadores que são possíveis de se encontrar na fábrica (Pereira, 2021).

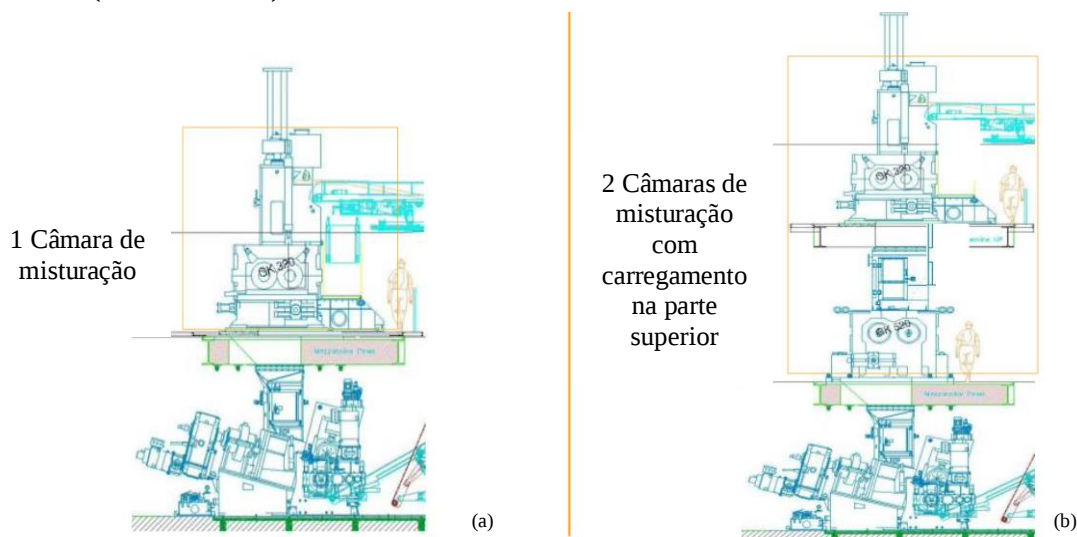


Figura 2.12: Esquema representativo do misturador (a) *single* e (b) *Tandem* (Pereira, 2021).

Uma das grandes vantagens da utilização do misturador *tandem* é o de facto existir um aumento da capacidade produtiva, uma vez que, não existe necessidade de armazenar o composto temporariamente entre cada processo de mistura (Sottomayor, 2019).

Concluído o processo de mistura, consoante o misturador e o tipo de mistura a que foi sujeito, o composto pode passar por uma extrusora, uma calandra e um moinho ou apenas por dois moinhos, sempre com o intuito de aumentar a misturação e homogeneização do composto, de modo a que seja possível este adquirir um aspeto de “folha” de composto de borracha. Seguidamente, o composto com aspeto de “folha” segue para uma estação de tanque de mergulho, designado de banho *anti-tacking*, para ocorrer o arrefecimento do composto através da imersão deste numa solução de água mais sabão. Por fim, antes do composto ser paletizado e armazenado, passa por um serviço de *bacth-off*, conjunto de sopradores, para secar o composto (Pereira, 2021).

O processo de mistura é então um processo complexo e, por esse motivo torna-se fundamental o seu controlo. Assim, existe um programa designado de *Mixing Management System*, MMS, que controla todas as possíveis variáveis do processo, dependendo das matérias-primas que estão a ser processadas. Este sistema consegue monitorizar parâmetros como a temperatura de mistura (°C) medida por um sensor interno no misturador, a velocidade de rotação dos rotores (rpm), o torque dos rotores (Nm), o tempo de mistura (s), o fator de enchimento (%), entre outros (Gomes, 2011; Feierabend, 2003).

Através da Figura 2.13, é possível observar uma representação idêntica à obtida no sistema MMS, onde se apresenta a temperatura e a energia exercida pelo martelo em função do tempo de mistura num processo de mistura *master batch*.



Figura 2.13: Representação gráfica da temperatura de mistura e da energia exercida pelo martelo em função do tempo de mistura (adaptado de (Feierabend, 2003)).

Tal como se observa na Figura 2.13 é possível distinguir alguns passos fundamentais. O carregamento, representado pelo número 1, corresponde ao início do processo, com o carregamento dos polímeros e enchedores no misturador (Feierabend, 2003).

De seguida, no passo 2 existe a incorporação dos enchimentos nos polímeros, ocorrendo um aumento da temperatura devido ao aumento de energia provocada pela movimentação do martelo pneumático (Feierabend, 2003).

No passo representado pelo número 3, ocorre o carregamento dos óleos e amaciadores, injetados lateralmente no misturador, seguido da dispersão do composto e início da reação de silanização (Feierabend, 2003).

Através da diminuição de energia seguido da sua estabilização, passo 4, é possível afirmar que acabou a dispersão e, portanto, começa a etapa designada de *plateau*, cujo principal objetivo é manter o composto a uma temperatura constante através da variação na velocidade dos rotores, de modo a garantir que ocorra a homogeneização e silanização do composto em produção (Feierabend, 2003).

Por fim, o último passo corresponde à fase de descarregamento do composto, como se observa no passo 5 da Figura 2.13 (Feierabend, 2003).

3 Controlo de Processos

No presente capítulo são abordados conceitos relativos aos sistemas de controlo, essenciais para a coordenação e segurança de todos os equipamentos e instalações e também para a satisfação das necessidades industriais, que tem vindo a aumentar, consideravelmente, ao longo das últimas décadas (Assystem, 2022).

Com o objetivo de tornar os processos industriais mais competitivos e com maior qualidade, aumentando a flexibilidade, a fiabilidade, a eficiência e a proteção do mesmo é fundamental recorrer a sistema de controlo de processos. O termo processo define-se como sendo a conversão de materiais noutros produtos, utilizando operações químicas ou físicas. Por outro lado, o termo controlo é definido como a manutenção das condições desejadas de um dado processo, sendo necessário realizar alguns ajustes às variáveis selecionadas nos sistemas (Siemens, 2022; Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016; Marlin, 2015).

Primeiramente, é de elevada relevância conhecer as variáveis que podem surgir nos diversos sistemas de controlo, sendo que, a seleção destas mesmas variáveis deve ter em consideração determinados objetivos. Assim, este passo, torna-se num passo crítico para o desenvolvimento do controlo de processos.

Geralmente, nos sistemas de controlo devem ser identificadas três tipos de variáveis importantes, a variável controlada, a variável manipulada e a perturbação. A variável controlada é a grandeza que é medida e controlada no sentido de manter o seu valor desejado. Por outro lado, a variável manipulada é ajustada, uma vez que é sobre esta que o sistema de controlo atua, com o intuito de conduzir a variável controlada para o valor de referência estabelecido. A perturbação ou carga é uma variável que afeta a variável controlada, mas que não é possível de ser manipulada (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Para ser possível compreender melhor alguns conceitos relativos ao controlo de processos é essencial saber interpretar um diagrama de blocos, que se trata de um fluxograma bastante utilizado pela engenharia na área de controlo de processos e, cujo objetivo passa pela criação de uma visão geral de um sistema, sendo possível incluir os seus principais componentes, entradas e saídas do processo, facilitando a visualização das relações existentes e análise de possíveis problemas de controlo (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Caso exista um bom conhecimento relativo ao funcionamento do processo, reúnem-se as condições necessárias para a construção do diagrama de blocos. Assim, na Figura 3.1, é possível observar um esboço de um diagrama de blocos generalizado com uma estratégia de controlo por retroação, explicada seguidamente.

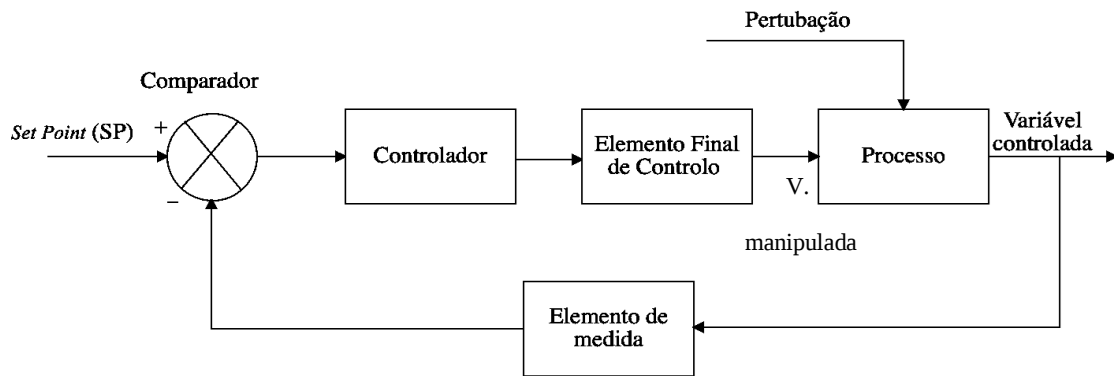


Figura 3.1: Diagrama de blocos generalizado para um sistema em ciclo fechado com uma estratégia de controlo de retroação (adaptado de (Kwong, 2013)).

Como se observa pela Figura 3.1, este tipo de diagrama, normalmente, é composto pelo processo, pelo elemento de medida, sensor e transmissor, pelo controlador e pelo elemento final de controlo. Cada bloco representado no diagrama corresponde a uma relação funcional existente entre a entrada e a saída de um dado componente, sendo que, o comportamento de cada elemento deve ser descrito, no bloco correspondente, através de uma função de transferência. Para ser possível obter uma diagrama de blocos global do processo, é necessário a combinação de todos estes blocos (Kwong, 2013; Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Relativamente à estratégia de controlo associada à Figura 3.1, esta é efetuada em ciclo fechado, uma vez que, a medida da variável controlada é “realimentada” a um dispositivo e comparada com o seu valor de referência. Este tipo de controlo caracteriza-se pela utilização do valor da variável controlada no ajuste da variável manipulada (Silva, 2022; Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

De notar que, aos sistemas de controlo podem associar-se diferentes tipos de estratégias de controlo, sendo que, estas dividem-se em dois grandes grupos, a estratégia de controlo por retroação e a estratégia de controlo por antecipação. Normalmente, a combinação destes dois tipos de controlo origina resultados mais eficientes. Das estratégias de controlo mencionadas, aquela que é utilizada com maior regularidade nas indústrias é a estratégia de controlo por retroação (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

3.1 Tipo de Controladores

Um controlador é definido como sendo um instrumento que altera a dinâmica do processo. Normalmente, quando se recorre a este tipo de controlos existem dois passos a seguir, onde ambos têm igual importância. Primeiramente a seleção do tipo de controlador e, de seguida, a seleção dos valores dos parâmetros do próprio controlador, de modo a que seja possível satisfazer os critérios de desempenho especificados para um determinado processo (Silva, 2022; Freitas, 2021).

A nível industrial, cada controlador apresenta características diferentes, provocando diferentes impactos no sistema a controlar, sendo que os controladores mais comuns podem ser organizados de acordo com a sua ação de controlo e são classificados em proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD) e proporcional integral derivativo (PID). Seguidamente, é então realizada uma breve descrição destes

controladores, visto que, a escolha do controlador mais adequado é um passo fundamental (Freitas, 2021).

3.1.1 Controlador Proporcional (P)

O controlador proporcional possui um ganho proporcional e consiste, essencialmente, num amplificador com ganho ajustável, definido anteriormente como sendo a diferença entre o valor de referência da variável controlada e o valor medido dessa variável, onde a relação entre o seu sinal de saída, $u(t)$, e o sinal de erro, $e(t)$, é dada pela equação 3.1 (MAR, 2001; Lourenço, 1996).

$$u(t) = K_p \times e(t) \rightarrow U(s) = K_p \times E(s) \quad \text{(Equação 3. 1)}$$

A ação proporcional, maioritariamente designada de ganho proporcional, realiza uma alteração na saída que é proporcional ao valor do erro real, tal como se pode concluir através da análise da equação 3.1 (Gomes, 2011; Silva, 2021).

A introdução do ganho proporcional vai permitir que o controlador reaja, de forma instantânea ao valor do erro, tornando a resposta do sistema mais rápida. No entanto, este tipo de controlador não elimina o *offset*, quer isto dizer que, não permite conduzir a um erro final nulo (Silva, 2021).

3.1.2 Controlador Proporcional Integral (PI)

Contrariamente ao que acontece no controlador proporcional, quando não é tolerável existir *offset* utiliza-se um controlador proporcional integral. Neste tipo de controladores a relação da saída é função do sinal do erro, $e(t)$, e do integral do sinal do erro ao longo do tempo, dada pela equação 3.2 (Silva, 2021; Freitas, 2021; Lourenço, 1996).

$$u(t) = K_p \times \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right) \rightarrow U(s) = K_p \times \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \times E(s) \quad \text{(Equação 3. 2)}$$

Onde τ_i é designado de tempo integral, ou seja, é o tempo necessário para que a contribuição da ação integral iguale a da ação proporcional e tem unidades de tempo (Lourenço, 1996).

Com a introdução da ação integral, vai existir uma tendência para tornar as respostas menos oscilatórias que, por consequência, pode contribuir para que o sistema seja mais lento, traduzindo-se numa desvantagem bastante relevante em determinadas aplicações. Por outro lado, o tempo integral é capaz de eliminar o *offset*, o que não acontece com o controlador proporcional (Freitas, 2021).

3.1.3 Controlador Proporcional Derivativo (PD)

Os controladores proporcionais derivativos, relativamente aos controladores proporcionais, incluem, adicionalmente, um parâmetro de controlo derivativo, sendo que, este tem como função antecipar o comportamento futuro do sinal de erro. Neste caso, o sinal de controlo, $u(t)$, é dado pela equação 3.3 e é proporcional ao erro e à taxa de alteração de sinal de erro ou da variável controlada (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016; Lourenço, 1996)

$$u(t) = K_p \times \left(e(t) + \tau_D \times \frac{de(t)}{dt} \right) \rightarrow U(s) = K_p(1 + \tau_D S) \times E(s) \text{ (Equação 3.3)}$$

Onde τ_D é designado de tempo derivativo, e tem unidades de tempo (Lourenço, 1996).

Com a observação da equação 3.3, é possível verificar que os controladores proporcionais derivativos, para além do valor do erro presente em cada instante de tempo, tem ainda a contribuição do tempo derivativo, calculado através da primeira derivada do erro em relação ao tempo (Gomes, 2011; Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Com a introdução do termo derivativo, o sistema vai usufruir do efeito antecipativo e, portanto, vai evitar efeitos na alteração da variável controlada. No entanto, esta ação não é capaz de eliminar o *offset* e, ainda, amplifica diretamente o ruído associado à medição da variável do processo, sendo que, por esse motivo, não deve ser utilizada de forma isolada (Freitas, 2021; Temel, Yagli, & Goren, 2013).

3.1.4 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

O controlador proporcional integral e derivativo é capaz de ser utilizado numa vasta gama de processos, tornando-se na prática, o controlador-padrão em contextos industriais, onde é possível obter desempenhos bastante satisfatórios com a sua utilização. Este controlador resulta então da combinação entre o ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo, e a sua saída é dada pela equação 3.4 (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

$$u(t) = K_p \times \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \times \frac{de(t)}{dt} \right) \rightarrow U(s) = K_p \times \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D s \right) \times E(s) \text{ (Equação 3.4)}$$

Neste tipo de controladores, o tempo integral vai eliminar o *offset* e a oscilação introduzida pela mesma vai ser de algum modo atenuada pelo tempo derivativo. Este termo, com o seu efeito estabilizador, produz uma ação de controlo não nula quando se verifica uma alteração do erro ou da variável controlada, permitindo uma redução na tendência para as oscilações, o que irá conduzir a uma velocidade de resposta superior quando comparada com os controladores proporcionais e proporcionais integrais. No entanto, a presença desta ação aumenta a tendência em amplificar o ruído nos sinais ruidosos (Silva, 2021; Lourenço, 1996; Freitas, 2021).

Depois de realizada esta descrição, relativa aos diferentes tipos de controladores, verifica-se que os controladores PID apresentam algumas motivações quando comparadas aos outros tipos de controladores, o que pode ser comprovado pela Figura 3.2. A Figura 3.2, ilustra o comportamento ao longo do tempo dos diferentes tipos de controlador apresentados anteriormente, quando são sujeitos à mesma variação na variável de perturbação (Gomes, 2011; Coughanowr & Koppel, 1965).

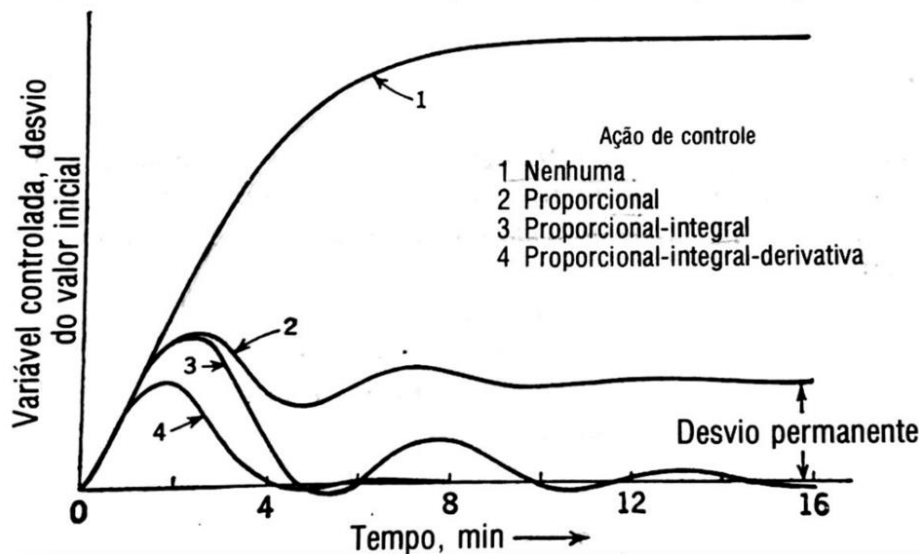


Figura 3.2: Representação gráfica das diferentes respostas para os vários tipos de controladores, com a introdução da mesma perturbação (Coughanowr & Koppel, 1965).

Após o início da perturbação, é possível verificar pela Figura 3.2 que existem comportamentos distintos, mediante o controlador que tem associado. No caso de não existir controlador, é notório que a variável continua sempre aumentar até atingir um novo estado estacionário. Se o controlador for do tipo proporcional, existe uma ação rápida na variável manipulada, impedindo a subida da variável controlada até um novo valor, sendo que a diferença entre este valor e o valor original é designado de desvio permanente. Por outro lado, com o controlador proporcional integral, há eliminação deste desvio permanente e, portanto, a variável controlada retorna ao valor desejado. No entanto, a resposta do sistema exibe um comportamento bastante oscilatório, como se observa também na Figura 3.2. Adicionando a este controlador o parâmetro derivativo, é possível detetar e atuar na variável controlada de forma mais rápida e com pouca ou nenhuma oscilação, tal como se verifica na Figura 3.2 (Coughanowr & Koppel, 1965).

É de salientar que a escolha dos controladores depende da aplicação e das especificações desejadas, sendo importante referir que, a adição de cada parâmetro vai torna a otimização do próprio controlador mais complexa (Coughanowr & Koppel, 1965).

Após a escolha do controlador mais adequado, procede-se à seleção dos valores de cada um dos parâmetros de controlo, tal como já referido. No entanto, para ser possível efetuar a melhor escolha destes valores, é necessário compreender a influência de cada uma das ações nos sistemas de controlo PID. Assim, de seguida, através da análise da Figura 3.3, é realizada uma descrição sucinta relativamente à influência de cada parâmetro de controlo.

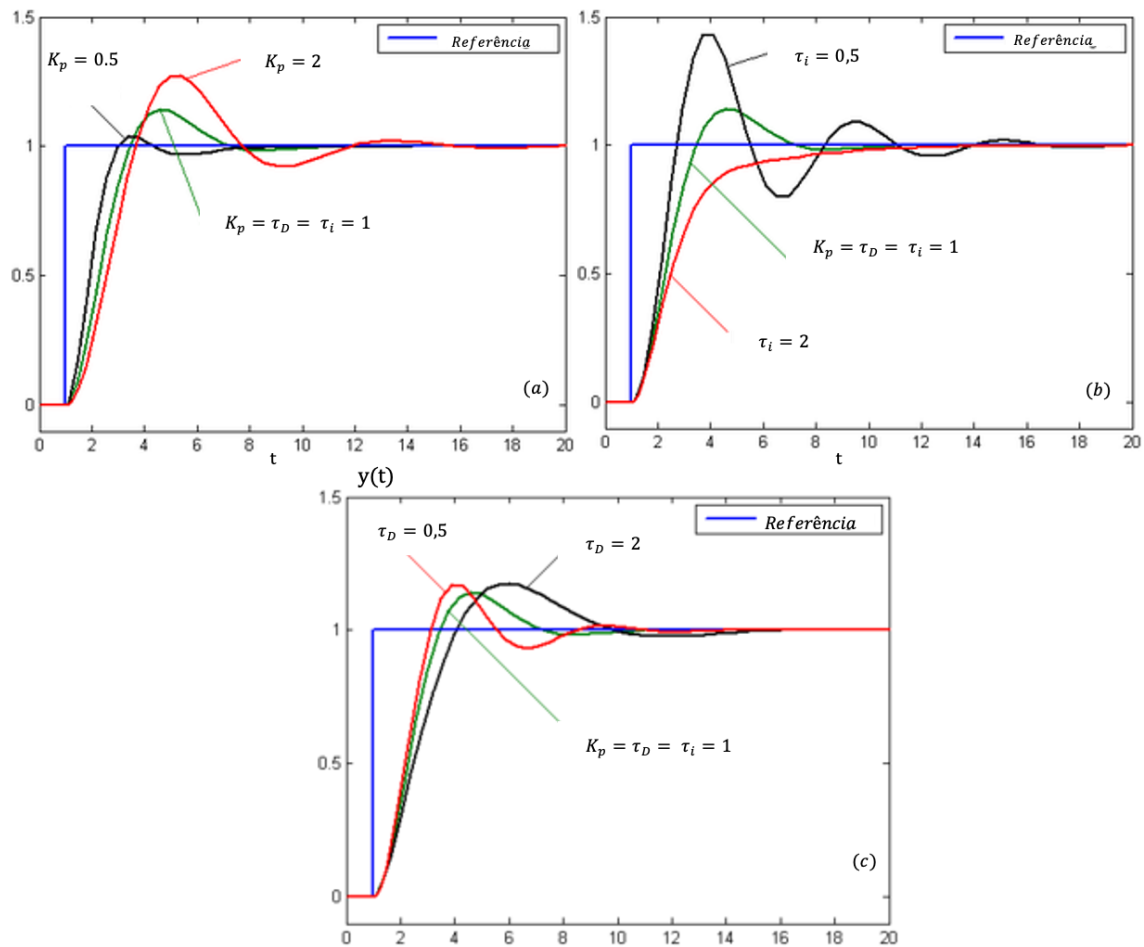


Figura 3.3: Representação gráfica relativa à influência dos parâmetros do controlador: (a) influência do ganho proporcional, K_p (b) influência do tempo integral, τ_i (c) influência do tempo derivativo, τ_D (Gomes, 2011).

Relativamente à Figura 3.3 (a), verifica-se que, os tempos integral e derivativo são constantes e, apenas varia o valor do ganho proporcional, sendo que, um elevado valor de K_p , resulta numa grande mudança no valor da sua saída e, caso este valor seja demasiado elevado, pode mesmo tornar o sistema instável. Por outro lado, um valor de K_p mais pequeno, origina uma pequena alteração na sua saída, que por consequência origina uma menor alteração no sinal de saída face ao mesmo valor de erro, o que significa que, o controlador é menos sensível (Gomes, 2011).

Analisando apenas a influência do tempo integral, Figura 3.3 (b), constata-se que, para valores mais elevados de τ_i , a reação torna-se mais lenta e, por consequência, a variável controlada pode ser corrigida com demasiado atraso, gerando, assim, elevados valores de *offset*. Pelo contrário, para valores de τ_i mais baixos, o sistema reage de forma mais rápida, embora que, se este valor for demasiado baixo, pode mesmo provocar grandes oscilações no sistema, tornando-o instável. É ainda importante salientar que, o tempo integral quando adicionado ao ganho proporcional, acelera o movimento do processo na direção do ponto definido, eliminando o erro residual de estado estacionário que ocorre com um controlador apenas proporcional (Gomes, 2011).

Finalmente, observando a Figura 3.3 (c), cuja finalidade é avaliar a influência do tempo derivativo, verifica-se que, para valores demasiado elevados de τ_D , a resposta do sistema é mais oscilatória, podendo tornar o processo instável (Gomes, 2011).

3.2 Sintonização de Controladores

Normalmente, quando ocorre a implementação de um sistema de controlo, os parâmetros são especificados, preliminarmente, com base num modelo do processo, nos objetivos que se pretende atingir e na experiência prévia. No entanto, em diversas circunstâncias, existem limitações que tornam a obtenção do modelo do processo difícil, ou até mesmo impossível (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Apesar de todos os métodos de sintonização terem por base algum conhecimento prévio relativo a todo o processo, existem diversas formas de determinar os valores dos parâmetros dos controladores, sendo possível categorizá-los de acordo com o facto dos seus modelos estarem ou não disponíveis. Assim, dentro destas categorias, é possível encontrar uma grande variedade de estratégias e métodos alternativos para a projecção dos controladores, destacando-se os métodos mencionados seguidamente (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

3.2.1 Métodos de Sintonização com Conhecimento do Modelo do Processo

Por um lado, se o modelo do processo é conhecido, a determinação dos parâmetros pode ser feita através de métodos analíticos que tem por base o conhecimento de todas as equações que modelizam o processo. Dos métodos analíticos existentes, destacam-se dois que são especialmente úteis no controlo de processo, são eles, o método de síntese direta e o método do controlo interno do processo (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

O método de síntese direta, desenvolvido no ano de 1950, é normalmente utilizado quando há variações no valor de referência, onde o principal objetivo é encontrar o controlador que forneça uma resposta adequada ao sistema, através de uma função de transferência, possibilitando o cálculo analítico das estimativas iniciais dos parâmetros. Por outro lado, o método do controlo interno do modelo foi desenvolvido por Morari e também usa quando há informação acerca do sistema. Este encontra-se intimamente relacionado com o método de síntese direta. (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

3.2.2 Métodos de Sintonização com Modelos Aproximados

Pelo contrário, quando os modelos do processo são relativamente complexos, utiliza-se um modelo mais simples, que passa pela obtenção de um determinado modelo aproximado. Para tal, é necessário introduzir uma perturbação em degrau na variável de entrada e, de seguida, registar o valor da variável medida, obtendo-se a curva de reação do processo (Freitas, 2021; Silva, 2022).

A título exemplificativo, John Ziegler e Nathaniel Nichols propuseram, no ano de 1942, dois métodos clássicos para a sintonização com modelos aproximados, o método da curva de reação do processo que se baseia na resposta obtida através de uma variação na entrada do sistema e o método da sensibilidade limite, que se baseia na resposta obtida, de forma experimental, com uma variação no valor de K_P (Silva, 2022; Pires, 2012).

3.2.3 Métodos de Sintonização Online

Quando em diversas situações, existem algumas limitações que podem ser impeditivas para a obtenção de um modelo, ou quando a informação acerca de um determinado sistema é reduzida e, portanto não se sabe qual a exatidão das funções de transferência, recorre-se à sintonização online e à sua conjugação com algumas das regras de sintonização, de modo a ser possível obter estimativas iniciais dos parâmetros bastante satisfatórias (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016; Freitas, 2021).

Geralmente, os métodos de sintonização online consistem em determinar, experimentalmente, as fronteiras de estabilidade para um sistema de ciclo fechado, muitas vezes através da tentativa e do erro. Assim, quando não são conhecidas informações acerca do processo, é possível recorrer, por exemplo, a um processo iterativo através da tentativa e do erro, efetuando modificações nas ações de controlo e, seguidamente, observando os efeitos provocados pelas mesmas. Estas modificações são efetuadas quando há o mínimo conhecimento sobre o sistema de controlo que se pretende sintonizar, de modo a minimizar os efeitos negativos que podem vir a ser causados (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016; Paiva, 2010).

Um exemplo de método de sintonização online, desenvolvido por Ziegler e Nichols, é o método *continuous cycling*, que foi o primeiro método de sintonização online introduzido, através da criação de novas regras de sintonização online que, de certo modo, permitiram observar um enorme impacto, tanto na investigação como na ação prática do controlo de processos (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Atualmente, apesar deste método ser bastante utilizado, tem vindo a sofrer algumas modificações sugeridas por alguns fabricantes, uma vez que é um método que apresenta algumas desvantagens, pelo facto de ser um processo iterativo, que pode tornar o processo bastante demorado, principalmente quando existe uma dinâmica do processo lenta e, além disso, pode não ser muito seguro, visto que, é necessário levar o processo aos limites da sua estabilidade (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Por volta do ano de 1984, Åström e Hägglund desenvolveram um novo método, designado de *Auto Tuning*, que se revelou uma excelente alternativa, uma vez que é realizado através de um simples teste experimental. Para tal, é necessário realizar a substituição temporária de um controlador por retroação por um controlador *on-off* (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

O método de *Auto Tuning* apresenta alguns benefícios relativamente ao primeiro método desenvolvido, uma vez que, se trata de um simples teste experimental e não é baseado na tentativa e no erro. Além do mais, produz, apenas, pequenas perturbações ao normal funcionamento e, portanto, o processo não é todo forçado para o limite de estabilidade (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

Resumindo, a otimização dos parâmetros do controlador pode ser realizada através da caracterização da dinâmica do processo, seguida da aplicação de um determinado método, tal como tem sido explicado, ou ainda, pode também ser realizada de forma manual, ou seja, através da escolha e alteração dos valores dos parâmetros até se obter a resposta desejada (Jesus, 2001)

Em alguns métodos, tal como num processo iterativo, podem ser relevantes seguir algumas diretrizes gerais existentes para sintonização de controladores, tais como (Marlin, 2015):

- O ganho do controlador é estimado como inversamente proporcional ao produto dos outros ganhos do ciclo de controlo;
- A qualidade do controlo diminui à medida que aumenta os tempos de assentamento e quando os desvios relativamente ao valor de referência são também maiores;
- Como estimativa inicial, deve usar-se a seguinte relação: $\tau_i = 4 \tau_D$, uma vez que, de uma forma geral, a relação τ_D/τ_i varia entre 0,1 e 0,3;
- Quando se procede à adição de um tempo integral, é comum, reduzir ao valor do ganho proporcional;
- Após adição do parâmetro derivativo, é possível aumentar o valor do ganho proporcional;

Quando se recorre algum método de sintonização, é importante ter em conta que, para ser possível obter um bom desempenho do sistema de controlo é necessário que este satisfaça alguns critérios, sendo eles, a estabilidade do sistema, uma boa rejeição das perturbações, a eliminação do *offset*, respostas rápidas e suaves e, além disso o sistema deve ser insensível a alterações das condições processuais e às imprecisões dos modelos dos processos (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016).

É ainda de salientar que, independentemente do método escolhido para sintonizar, não existe nenhuma conclusão relativamente à exatidão ou aptidão deste tipo de métodos e, portanto, os valores dos parâmetros obtidos são meramente aproximações iniciais dos parâmetros dos controladores. Por esse mesmo motivo, quando em funcionamento será fundamental ajustar os valores dos parâmetros para fazer face à especificidade de cada sistema (Lourenço, 1996; Freitas, 2021).

4 Otimização do Controlo da Temperatura no Interior do Misturador

O capítulo quatro da presente dissertação inicia com uma breve descrição relativa ao problema existente na empresa, seguido de um levantamento das condições operatórias atuais e das condições em que será realizada toda a parte prática. Por fim, são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados, com o intuito de alcançar uma combinação de valores satisfatória.

4.1 Problema Proposto

Na etapa da misturação, explicada no subcapítulo 2.4, observou-se a geração de grandes quantidades de calor. O fenómeno descrito aconteceu devido às elevadas forças de atrito e às tensões de corte criadas no composto durante a compressão do martelo pneumático com rotores em movimento.

Como referido também no subcapítulo 2.4, a misturação é caracterizada por possuir várias fases. De todas, para a presente dissertação, a fase que importa destacar, é a designada de *plateau*, cujo objetivo é atingir e, de seguida, manter o composto a uma temperatura previamente definida, para ser possível a reação de silanização. Para além disso, a temperatura tem a capacidade de influenciar diretamente algumas propriedades futuras do composto, como a dureza e o ressalto que, por consequência, tem impacto nas propriedades futuras do pneu. Assim, é fundamental existir um controlo de temperatura no interior da câmara de misturação, de modo a salvaguardar todas as propriedades do pneu final.

De uma forma geral, para o controlo de temperatura em processos, são utilizados controladores do tipo PID. O mesmo acontece na fábrica, uma vez que, os controladores instalados nos misturadores são do tipo PID, integrados no sistema Siemens, com capacidade de controlar a temperatura do misturador durante toda a fase *plateau*, através da utilização de sensores internos de temperatura, localizados no interior da câmara de misturação. Neste controlo em específico, a variável controlada é a temperatura da câmara de misturação e a variável manipulada é a velocidade dos rotores do misturador. De notar que, a elevação do martelo vai ter uma grande influência na temperatura do composto, uma vez que, quanto maior a sua pressão, maior é o calor que é capaz de gerar, consequentemente, maior é a temperatura no interior do misturador e, portanto, a energia exercida pelo martelo funciona como uma variável de carga ou perturbação. Através da Figura 4.1 é possível observar um diagrama de blocos simplificado do sistema de controlo implementado nos misturadores.

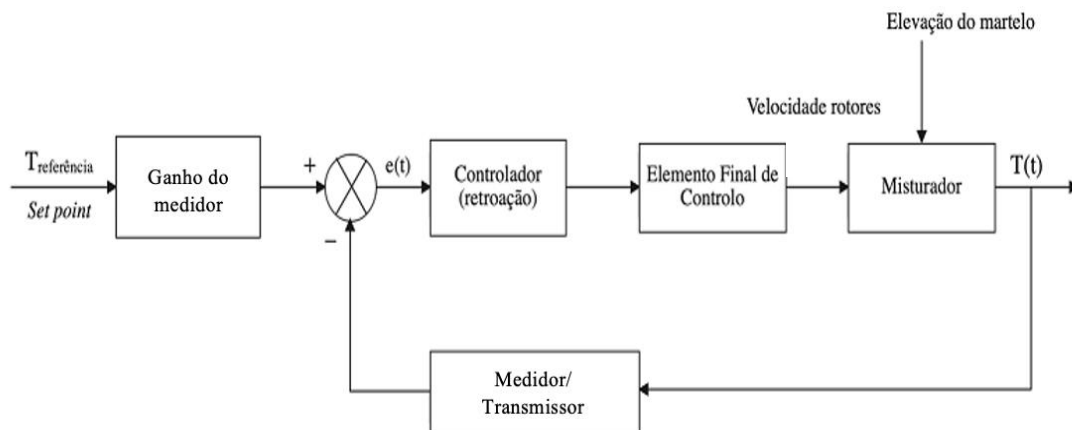


Figura 4.1:Diagrama de blocos para o sistema de controlo implementado.

O sistema de controlo da Figura 4.1, funciona do seguinte modo: a variável controlada, ou seja, a temperatura da carga, está constantemente a ser lida e quando chega ao valor de referência, a velocidade dos rotores começa a diminuir, de modo a permitir o arrefecimento da carga no interior o misturador. Contudo, se existir, por exemplo, um valor excessivo do ganho proporcional, pode causar uma rápida diminuição na velocidade dos rotores, resultando num arrefecimento exagerado. Nesta situação, através de um sinal elétrico, a velocidade dos rotores do misturador aumenta de tal forma que, a temperatura atinge novamente o valor de referência e, assim, este ciclo vai-se repetindo indefinidamente, sempre com o intuito de manter a temperatura de referência no interior da câmara de misturação.

No entanto, alguns destes controladores instalados na fábrica não estão otimizados, o que pode provocar alterações nas propriedades viscoelásticas do composto. Por esse motivo, torna-se essencial a otimização dos parâmetros destes mesmos controladores.

É possível visualizar esta situação através das curvas do processo que são obtidas no sistema do MMS. Para ser mais fácil de compreender esta questão, considera-se um exemplo de uma situação atual, onde existe produção do composto A no misturador 7. Para a produção deste mesmo composto, é indicado na receita que a fase *plateau* tem de estar compreendida entre os passos 8 e 11 e, portanto, nestes passos a temperatura tem de ser constante e igual a 165°C, permitindo um desvio de $\pm 3^\circ\text{C}$.

Através da ferramenta MMS, foi possível obter um exemplo de gráfico para o composto referido acima, Figura 4.2, onde se observa as curvas de temperatura da carga, velocidade dos rotores e elevação do martelo pneumático em função do tempo total de misturação, que inclui, como se observa na Figura 4.2, as fases de carregamento, *plateau* e descarga.

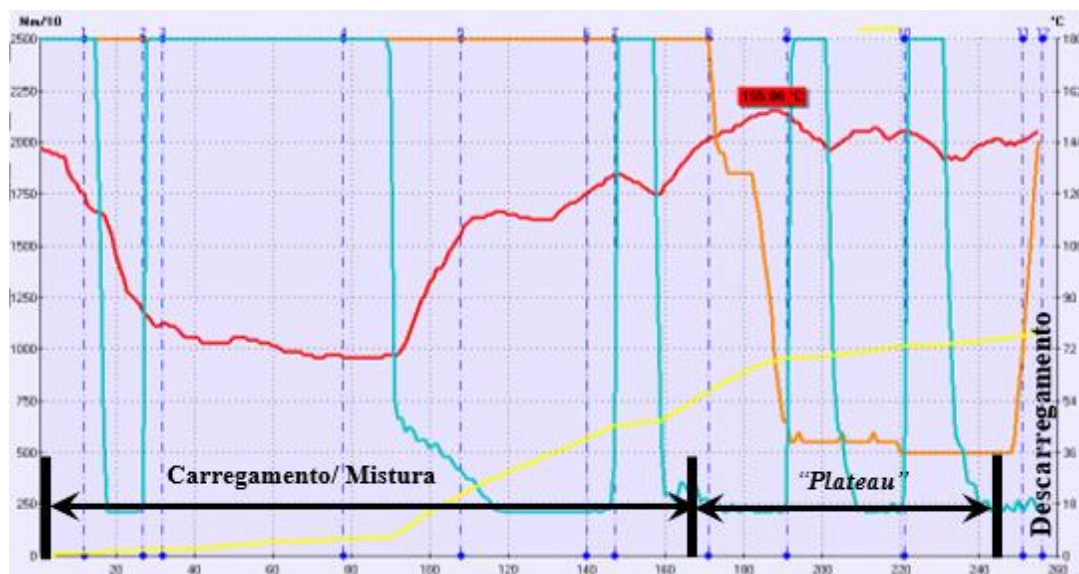


Figura 4.2: Representação gráfica das curvas de temperatura da carga (vermelho), velocidade dos rotores (laranja) e elevação do martelo pneumático (azul) em função do tempo da misturação (Gomes, 2011).

Analisando a curva da Figura 4.2, referente à temperatura da carga é possível afirmar que não existe um bom funcionamento do sistema, uma vez que, está definido pelo DIP que a temperatura das cargas, durante toda a fase de *plateau*, deve ser igual a 165°C e, tal como se observa na Figura 4.2, o mesmo não acontece, uma vez que, a temperatura apenas atinge o valor máximo de 155°C, valor bastante inferior ao valor de referência, não garantindo assim a ocorrência da reação de silanização. Desta forma, pela análise de Figura 4.2, conclui-se que durante a fase de *plateau*, a temperatura sofre muitas oscilações, não sendo capaz sequer de atingir a temperatura necessária, verificando-se assim, que o controlo não está a funcionar da forma mais eficiente.

Com vista a obtenção de melhores resultados e pelo facto dos parâmetros de controlo do controlador PID apresentarem valores não ajustados de acordo com o processo, a empresa decidiu restringir o intervalo de valores da velocidade dos rotores, de modo a que a temperatura no interior da câmara de misturação não sai muito dos limites de temperatura estabelecidos, garantindo assim a ocorrência da reação de silanização.

Na expectativa de encontrar uma possível resolução a este problema, o Departamento de Industrialização do Produto (DIP) decidiu propor a presente dissertação com o intuito de estudar e testar alterações aos valores dos parâmetros do controlador PID que, do ponto de vista prático, é o passo mais importante para a satisfação dos critérios de desempenho e à resolução do problema apresentado.

4.2 Condições Operatórias Atuais

Após o descrito no subcapítulo 4.1, e antes de qualquer alteração nos parâmetros do controlador, é essencial realizar uma caracterização das condições atuais relativas ao sistema de controlo.

Atualmente, cada misturador possui um ou dois controladores PID, sendo que todos os controladores possuem sempre um perfil de valores associado, cuja alteração é possível de realizar a qualquer altura, em função da receita do composto. Os valores de cada perfil são referentes aos parâmetros de controlo proporcional, integral e derivativo do controlador e, são introduzidos no sistema MMS. Na Tabela 4.1, é possível observar os valores dos parâmetros do controlador PID para cada perfil criado de raiz pela empresa e que ainda se encontram disponíveis.

Tabela 4.1. Registo dos valores dos parâmetros do controlador PID para cada perfil existente na empresa.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_d (s)
Perfil 1	6	2,5	0
Perfil 2	11	2,5	0
Perfil 3	3	2	0

Observando a Tabela 4.1, é possível verificar que, atualmente, existem três perfis disponíveis, todos com valores distintos entre si. Desta forma, é de esperar que, o perfil com o maior valor de ganho proporcional, tenha a reação mais rápida e, consequentemente, uma maior variação na velocidade dos rotores. Por outro lado, com a introdução do tempo integral é de esperar uma eliminação do *offset*, porém, para valores demasiado baixos, as respostas podem ser bastante oscilatórias, não favorecendo o funcionamento dos equipamentos. É ainda de salientar que, na situação atual, todos os perfis possuem o valor do parâmetro derivativo igual a zero (Gomes, 2011).

Para além disso, é também relevante conhecer as condições do misturador 10, onde decorreram, maioritariamente, os testes práticos da presente dissertação. O misturador 10 é do tipo *Tandem*, ou seja, possui duas câmaras de mistura, com uma capacidade produtiva média mensal de 2240 toneladas, sendo que, para cada câmara existe um controlador PID. Normalmente, neste misturador, para ambos os controladores implementados, utiliza-se sempre o mesmo perfil de valores dos parâmetros de controlo (Perfil 2 da Tabela 4.1), independentemente do composto que está a ser produzido.

Com o intuito de caracterizar e analisar melhor a situação atual dos controladores PID do misturador 10, realizaram-se os primeiros testes práticos, onde se testaram todos os perfis anteriormente criados e que, ainda, estão disponíveis no sistema. Nesta série de testes foram realizadas 15 cargas do composto B, no misturador 10, sendo que, a única variável a alterar foi o perfil a ser utilizado. Assim, na Tabela 4.2 estão representadas todas as cargas realizadas nesta série de testes, bem como as suas condições.

Tabela 4.2. Condições de realização das primeiras cargas.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Carga	Composto	Plateau	t Plateau (s)
2	11	2,5	0	5	B	Passo 8	30
1	6	2,5	0	5			
3	3	2	0	5			

Depois de realizados os testes com as condições da Tabela 4.2, torna-se essencial efetuar uma análise e caracterização das respostas obtidas do processo, com o objetivo de concluir qual a tendência dos parâmetros de controlo e qual dos perfis apresenta os resultados mais eficazes. Esta caracterização pode ser efetuada, destacando duas das seis importantes características que permitem descrever a resposta do sistema, e são elas, o tempo de subida, ou seja, o tempo ao fim do qual a resposta atinge, pela primeira vez, o valor de referência e o *overshoot* que é a razão entre a máxima quantidade em que a resposta do sistema excede o valor final e o valor final da resposta do processo após ser submetido a um determinado estímulo, podendo ser expresso em percentagem, % (Seborg, Edgar, Mellichamp, & Doyle, 2016; Coughanowr & Koppel, 1965).

Para ser possível a obtenção destes parâmetros, é necessário proceder-se à construção das curvas de temperatura de cada carga efetuada em função do tempo de *plateau*. Para tal, foi preciso extrair, do sistema MMS, os valores de temperatura de cada carga em função do tempo e, estes valores encontram-se detalhados no Anexo A. Na Figura 4.3, é possível observar as representações gráficas das curvas de temperatura em função da fase de *plateau* para os perfis em teste, para de seguida, ser possível analisar as respetivas respostas, efetuando uma comparação entre estas.

De modo a completar a análise e caracterização das respostas obtidos pelo sistema de controlo, é ainda importante observar o comportamento da variável manipulada. Para tal, realizou-se igualmente uma extração de todos os valores relativos à velocidade dos rotores, sendo que, estes se encontram detalhados no Anexo A e, em seguida, procedeu-se à representação gráfica da velocidade dos rotores em função do tempo de *plateau*, como se observa também na Figura 4.3.

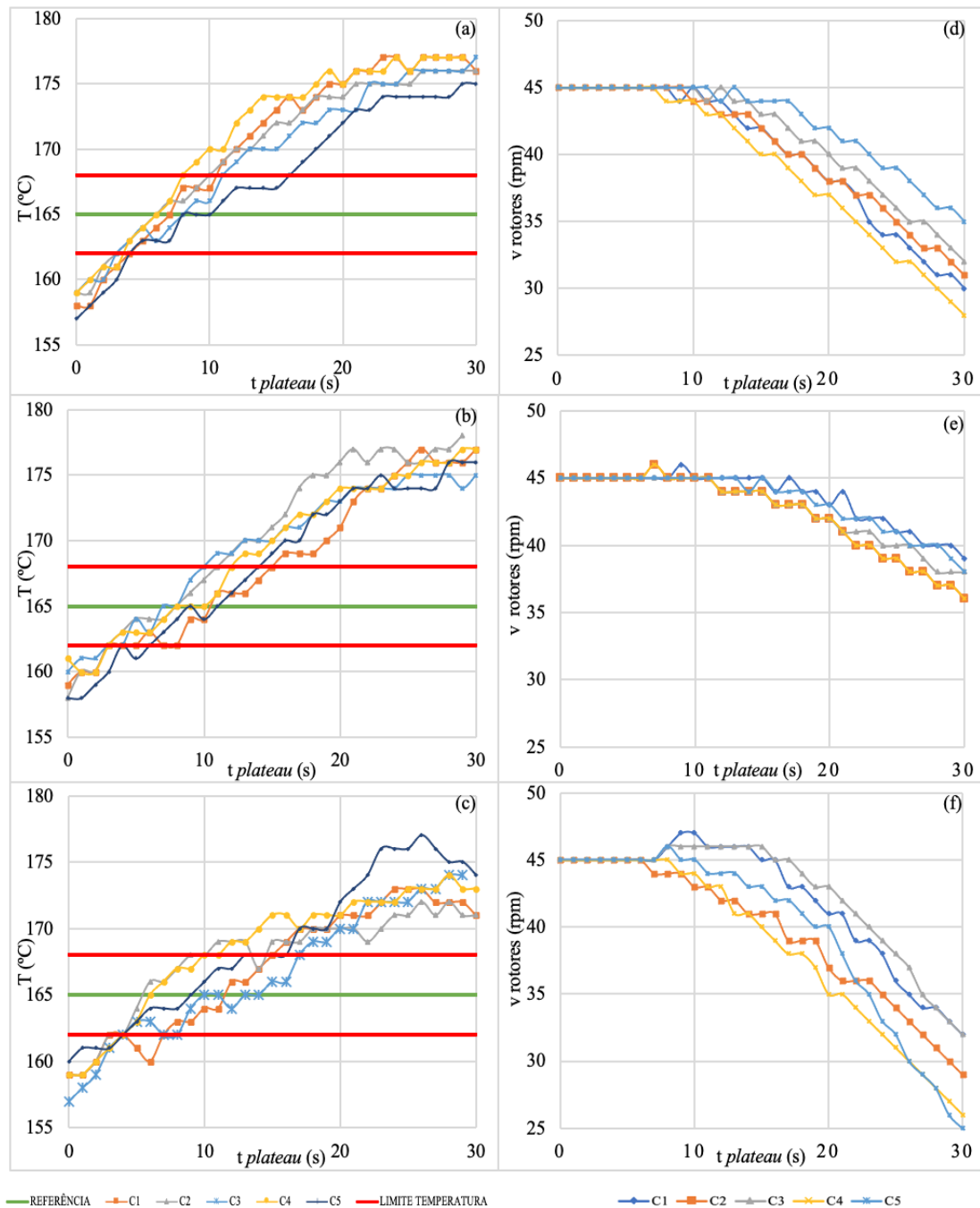


Figura 4.3: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador em função do tempo para os seguintes perfis: (a) $K_p=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s (b) $K_p=3$; $\tau_i=2$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; e da velocidade dos rotores em função do tempo: (d) $K_p=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (e) $K_p=3$; $\tau_i=2$ s; $\tau_D=0$ s (f) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s.

Relativamente às curvas de temperatura, verifica-se pelas Figuras 4.3 (a) e 4.3 (b) que, as representações gráficas que têm associado os perfis 1 e 3 apresentam um comportamento idêntico, quer isto dizer, as cinco cargas que foram realizadas para ambos os perfis atingem a temperatura de referência entre os 5 e os 11 segundos e, após este tempo, o sistema permite que a temperatura continue a subir atingindo o valor de referência em todas as cargas efetuadas. Após atingir a temperatura de 165°C, o sistema não é capaz de manter a sua temperatura, aumentando sempre até valores entre os 174 °C

e os 178°C. Isto indica que, o controlador não está a ter um bom desempenho, dado que, não se verifica nenhuma tendência para a descida de temperatura, levando assim afirmar que, os parâmetros de controlo associados aos perfis 1 e 3 não estão ajustados.

Observando a Figura 4.3 (c), verifica-se que inicialmente as curvas de temperatura apresentam um comportamento semelhante às curvas analisadas anteriormente, no entanto, esta é a única representação onde se observa uma tendência no sentido de reduzir a temperatura das cargas para valores mais próximos do valor de referência, não atingindo assim temperaturas máximas tão elevadas. Consequentemente, os valores de *overshoot* quando comparados com os dos perfis 1 e 3 são mais baixos, uma vez que, para o perfil 2 as temperaturas das cargas apresentam valores de *overshoot* entre 4,2% e 5,5% e os perfis 1 e 3 apresentam *overshoot* entre 6,1% e 7,9%, valores que se encontram no Anexo A. Por este motivo, o perfil 2 é o que apresenta um maior destaque, o que pode explicar também o facto de este ser o mais utilizado em produção normal.

No que diz respeito às curvas de velocidade dos rotores, comparando as representações gráficas da Figura 4.3, é possível verificar que a Figura 4.3 (f) é a que apresenta uma maior gama de variação na velocidade dos rotores, atingindo as 25 rotações por minuto, seguido da Figura 4.3 (d) que chega a um valor mínimo de 28 rotações por minuto e, finalmente a Figura 4.3 (e), é onde existe uma menor variação na velocidade dos rotores, chegando apenas às 36 rotações por minuto. Com isto, conclui-se que, o ganho proporcional tem uma grande influência na variável manipulada, uma vez que, quanto maior é este parâmetro, maior é a variação na velocidade dos rotores. Pelo facto do perfil 2, Figura 4.3 (f), apresentar maiores variações na velocidade dos rotores em relação à dos outros perfis, vai permitir obter um melhor arrefecimento e, consequentemente uma aproximação do valor da temperatura da carga ao seu valor de referência.

Para além disso, tendo ainda em consideração a Figura 4.3 e independentemente do controlador PID estar ou não otimizado, é possível verificar que, este está a reagir, e tal como seria de esperar, de forma mais rápida quando o perfil apresenta um valor de ganho proporcional também mais elevado.

Com base nesta análise, constata-se que atualmente o perfil 2 apresenta resultados mais satisfatórios comparativamente com o perfil 1. Por esta razão e de forma a atingir o objetivo final, considera-se que os próximos testes práticos a realizar deverão ser baseados no perfil 2. Quanto ao perfil 3, não é possível realizar grandes comparações com os outros perfis, pelo facto de o tempo integral possuir um valor diferente.

De notar que, para estes testes práticos o tempo de *plateau* foi de apenas 30 segundos, não existindo tempo para se observar o comportamento real da resposta, visto que, este tempo é demasiado curto e provavelmente a dinâmica deste sistema é também lenta. Por este motivo, foi necessário tentar aumentar a fase *plateau*, portanto, para testes futuros terá interesse fazer esta mesma alteração na receita.

4.3 Levantamento de Resultados

No presente subcapítulo, estão descritos os principais testes efetuados, com detalhe de todas as combinações de valores propostas, bem como os respetivos resultados obtidos. Lembrar que, todos os testes práticos foram realizados com o intuito de diminuir o tempo de subida e o valor de *overshoot*, de modo a otimizar a temperatura no interior da câmara de mistura durante a fase de *plateau*, tendo sempre em conta o compromisso existente entre a otimização da temperatura e as oscilações mínimas na velocidade dos rotores.

É ainda importante referir que, para a seleção dos valores dos parâmetros de controlo, terá de se recorrer a um processo iterativo, uma vez que, o sistema implementado apresenta uma enorme complexidade, não sendo assim possível, através de nenhum método de sintonização estudado na secção 3.3, calcular as estimativas iniciais dos parâmetros do controlador PID pois, não são conhecidas funções transferência do processo, nem é exequível proceder-se à abertura do ciclo, de modo a obter a curva de reação do processo. Por este motivo, as combinações de valores escolhidas para um determinado teste dependeram sempre dos resultados obtidos em testes realizados anteriormente.

Os testes realizados foram agrupados em três conjuntos de testes, o primeiro conjunto que tem como intuito estudar o efeito do ganho proporcional no sistema, seguido do segundo conjunto cujo objetivo é avaliar o efeito do tempo integral no sistema, sendo que, após isto, é necessário a realização de alguns ajustes em ambos os parâmetros de controlo. Efetuados os ajustes necessários, procede-se à realização do terceiro conjunto de testes, avaliando o efeito do tempo derivativo e, finalmente, uma vez realizados estes testes, é essencial proceder-se aos ajustes finais, no sentido de chegar a resultados o mais satisfatórios possíveis.

Primeiramente, conforme descrito, é importante estudar e avaliar o ganho proporcional do controlador, onde, para tal, é necessário escolher e testar um conjunto de diferentes valores para o ganho proporcional. Para tal, decidiu-se realizar 19 cargas do composto B, onde a única variável a alterar foi o valor escolhido para o ganho proporcional. Tendo por base o perfil 2, e aplicando uma sequência de valores, com um passo igual a 5, fez-se variar o ganho proporcional, para valores superiores ao valor do ganho proporcional do perfil mencionado. Na Tabela 4.3, estão reunidas as condições em que foram realizados todos os testes que pertencem ao primeiro conjunto de testes.

Tabela 4.3. Cargas realizadas e respetivas condições de realização do primeiro conjunto de testes.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_d (s)	Nº Cargas	Composto	Plateau	t plateau (s)
2	11	2,5	0	5	B	P 9 e P10	60
4	16	2,5	0	5			
5	21	2,5	0	5			
6	26	2,5	0	4			

Antes de iniciar os testes práticos e como se observa na Tabela 4.3, foi necessário realizar algumas alterações na receita deste composto, tais como o aumento do tempo da fase *plateau*, de modo a ser possível observar durante mais tempo o comportamento real da resposta e a influência dos valores dos parâmetros do controlador. Para tal, aumentou-se a duração do tempo de *plateau* para um total de 60 segundos, dividindo-a em dois passos, 9 e 10, com uma elevação do martelo a meio tempo. Assim, realizaram-se novamente 5 cargas com o perfil 2, para de seguida, ser possível comparar com os quatro perfis criados, perfil 4, cujo ganho proporcional é igual a 16, o perfil 5, com um valor de ganho proporcional de 21 e o perfil 6, cujo ganho proporcional é igual a 26. Em todos estes perfis, os tempos integral e derivativo foram mantidos constantes e iguais ao perfil 2.

Após a realização deste conjunto de testes, procedeu-se, novamente, à construção das curvas de temperatura e velocidade dos rotores, cujos valores encontram-se tabelados no Anexo B. A Figura 4.4 representa as curvas de temperatura e de velocidade dos rotores em função do tempo de *plateau* para cada perfil da Tabela 4.3.

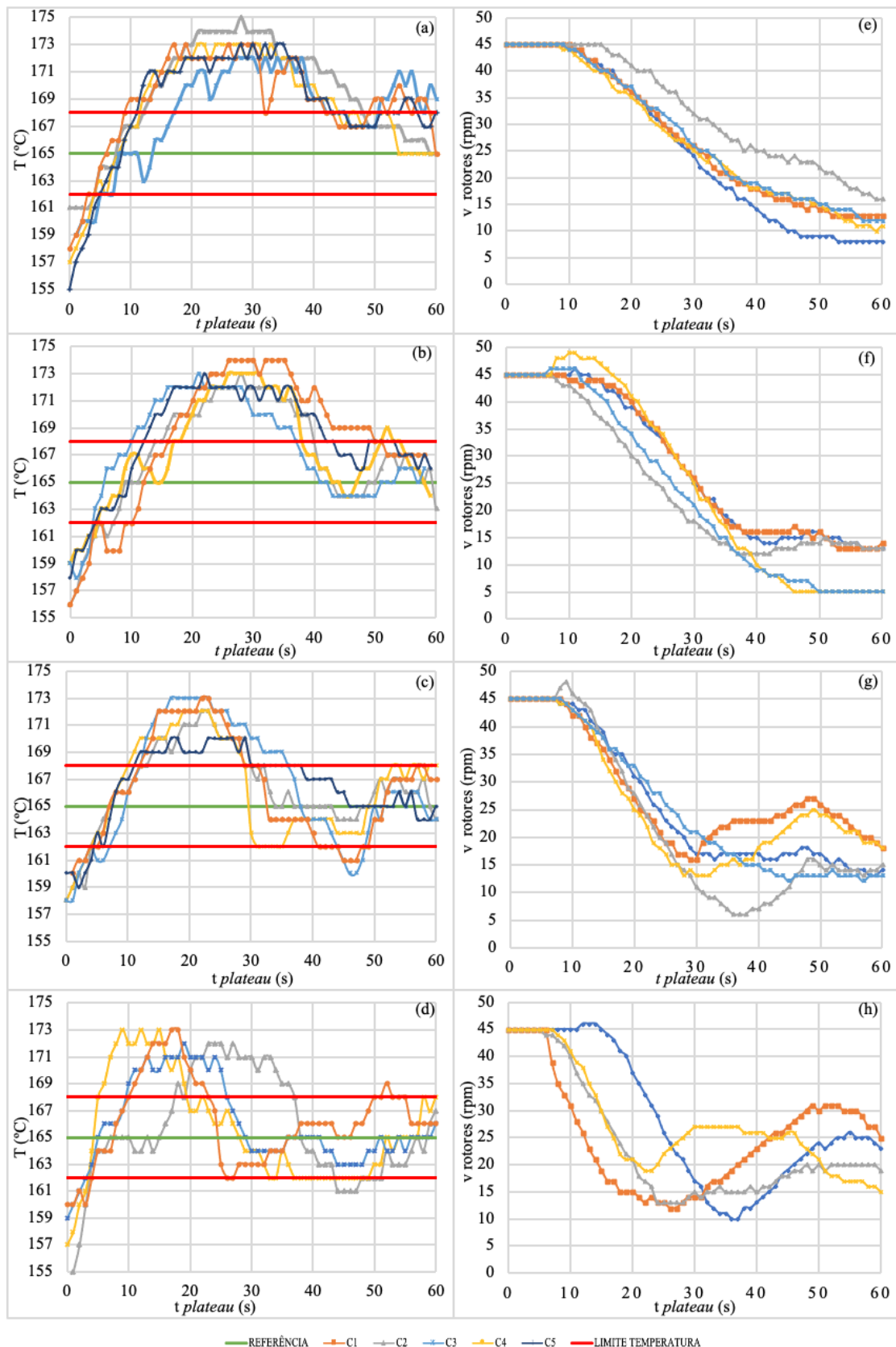


Figura 4.4: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (f) $K_p=16$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (c) e (g) $K_p=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (d) e (h) $K_p=26$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s.

Analisando os resultados obtidos das curvas de temperatura, para as várias representações da Figura 4.4, constata-se que, existe uma grande diferença entre os diferentes ensaios relativamente ao tempo necessário para que a temperatura da carga volte a atingir o valor de referência, após ter alcançado o tempo de subida. Observando a Figura 4.4 (a), o tempo necessário está entre os 55 e 60 segundos, o que significa que, para a temperatura chegar ao valor de referência necessita de, praticamente, toda a fase de *plateau*. Por outro lado, as Figuras 4.4 (b) e 4.4 (c) apresentam cargas com tempos inferiores, na ordem dos 40 e 30 segundos, respetivamente. A mesma tendência se verifica com a Figura 4.4 (d), uma vez que, este tempo reduz para metade comparativamente com a Figura 4.4 (a), chegando a alcançar a referência entre os 22 e 30 segundos, apesar de se notar algumas oscilações nas respostas obtidas.

Com esta análise, é possível concluir que à medida que se aumenta o ganho proporcional, verifica-se uma diminuição no tempo necessário para que a temperatura volte aos 165oC e, isto pode acontecer, pelo facto do sistema demorar menos tempo a reagir, por outras palavras, ganhos proporcionais mais elevados, levam o sistema de controlo a reagir de forma mais rápida e, por consequência, este permite que, a temperatura atinja o valor de referência também mais rápido.

Ao nível da velocidade dos rotores, verifica-se alguma discrepância para os diferentes perfis. Começando pela Figura 4.4 (d), observa-se que, os rotores ao longo do tempo vão diminuindo a sua velocidade, sem ocorrência de grandes oscilações, visto que, neste caso, o ganho proporcional é também relativamente pequeno, ou seja, o controlador atua de uma forma mais lenta. No entanto, conforme se vai aumentando o ganho proporcional, as variações na velocidade dos rotores vão sendo mais elevadas e bruscas e, tal como esperado, é na Figura 4.8 (h) que se visualiza as maiores oscilações de velocidade, uma vez que, esta representação tem associado o maior valor de ganho proporcional testado. Apesar disso, é necessário ter em conta que, as respostas mais oscilatórias não favorecem o funcionamento dos equipamentos, podendo provocar o desgaste dos mesmos que, por consequência, diminui o seu período de vida útil.

Ainda com base na Figura 4.4, é possível retirar alguns parâmetros de caracterização, tais como, valores dos tempos de subida e de *overshoot*. Para tal, de forma a organizar melhor a informação, estes valores foram lidos e, de seguida, reunidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Registo dos valores dos parâmetros de caracterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e overshoot para cada perfil testado.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Cargas	t subida (s)	Overshoot (%)
2	11	2,5	0	1	8	5,5
				2	8	4,8
				3	7	4,2
				4	6	0,8
				5	9	4,8
4	16	2,5	0	1	9	4,8
				2	9	4,8
				3	6	4,8
				4	12	5,5
				5	10	4,8
5	21	2,5	0	1	7	4,2
				2	7	4,2
				3	10	4,8
				4	6	4,8
				5	8	3,0
6	26	2,5	0	1	7	4,2
				2	5	4,8
				3	5	4,2
				4	8	4,8

Em relação aos tempos de subida, destaca-se o perfil 6 da Tabela 4.4, dado que, de uma forma geral, é o perfil que apresenta os menores tempos de subida, ou seja, foi onde se obteve as respostas mais rápidas, atingindo o valor pretendido com maior rapidez, tal como seria de esperar, visto que, o perfil 6 possui na sua combinação de valores o maior valor de ganho proporcional testado.

Em relação aos valores de *overshoot*, estes são bastante semelhantes entre si, com valores, em termos médios, de 5% como se verifica na Tabela 4.4. Isto pode ser explicado, pelo facto de todos estes perfis apresentarem o mesmo valor de tempo integral que, por sua vez, também não está otimizado. Com base nos valores reunidos na Tabela 4.4, é possível afirmar que, os tempos de subida variam consoante o valor de ganho proporcional, contrariamente, este parâmetro não aparenta ter grande influência na redução do *overshoot*.

Finalizado o primeiro conjunto de testes, é importante tomar a decisão de fixar um valor de ganho proporcional. Assim, apesar do perfil 6 cujo ganho proporcional toma o valor de 26, ter sido aquele que apresentou resultados mais satisfatórios ao nível da otimização da temperatura, foi também o que apresentou as respostas mais oscilatórias relativamente à velocidade dos rotores. Tendo em conta o objetivo da presente dissertação e o compromisso existente entre a otimização da temperatura e a minimização das variações bruscas na velocidade dos rotores, decidiu-se fixar o valor do ganho proporcional em 21, uma vez que, também apresenta bons resultados relativamente ao comportamento da temperatura e possui, em geral, variações de velocidade dos rotores menos acentuadas.

Após a conclusão do primeiro conjunto de testes, segue-se para o próximo passo que consiste na variação do valor do tempo integral. Este passo é referente ao segundo conjunto de testes, onde foi definido realizar 16 cargas do composto B, em que, cada perfil criado possui um valor diferente de tempo integral. Na Tabela 4.5, encontram-se presentes as cargas realizadas, bem como as suas condições.

Tabela 4.5. Cargas realizadas e respetivas condições de realização do segundo conjunto de testes.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Nº Cargas	Composto	$t_{plateau}$ (s)
7	21	3,5	0	4	B	60
5	21	2,5	0	4		
8	21	1,5	0	4		
9	21	1	0	4		

Como se verifica, através da Tabela 4.5, foram mantidas todas as condições anteriores e foram testados três novos perfis, nos quais os parâmetros proporcional e derivativo se mantem constantes e apenas se varia o tempo integral. De modo a concluir qual a influência deste parâmetro no sistema de controlo, aplicou-se, inicialmente, uma sequência de valores entre 1 e 3,5 segundos.

Após a testagem dos perfis apresentados na Tabela 4.5, foi possível extrair, através da ferramenta MMS, os valores necessários, que se encontram detalhados no Anexo C, para se proceder à construção das curvas de temperatura e da velocidade dos rotores. A Figura 4.5 representa as curvas de temperatura e velocidade dos rotores em função do tempo de *plateau* para os diferentes perfis.

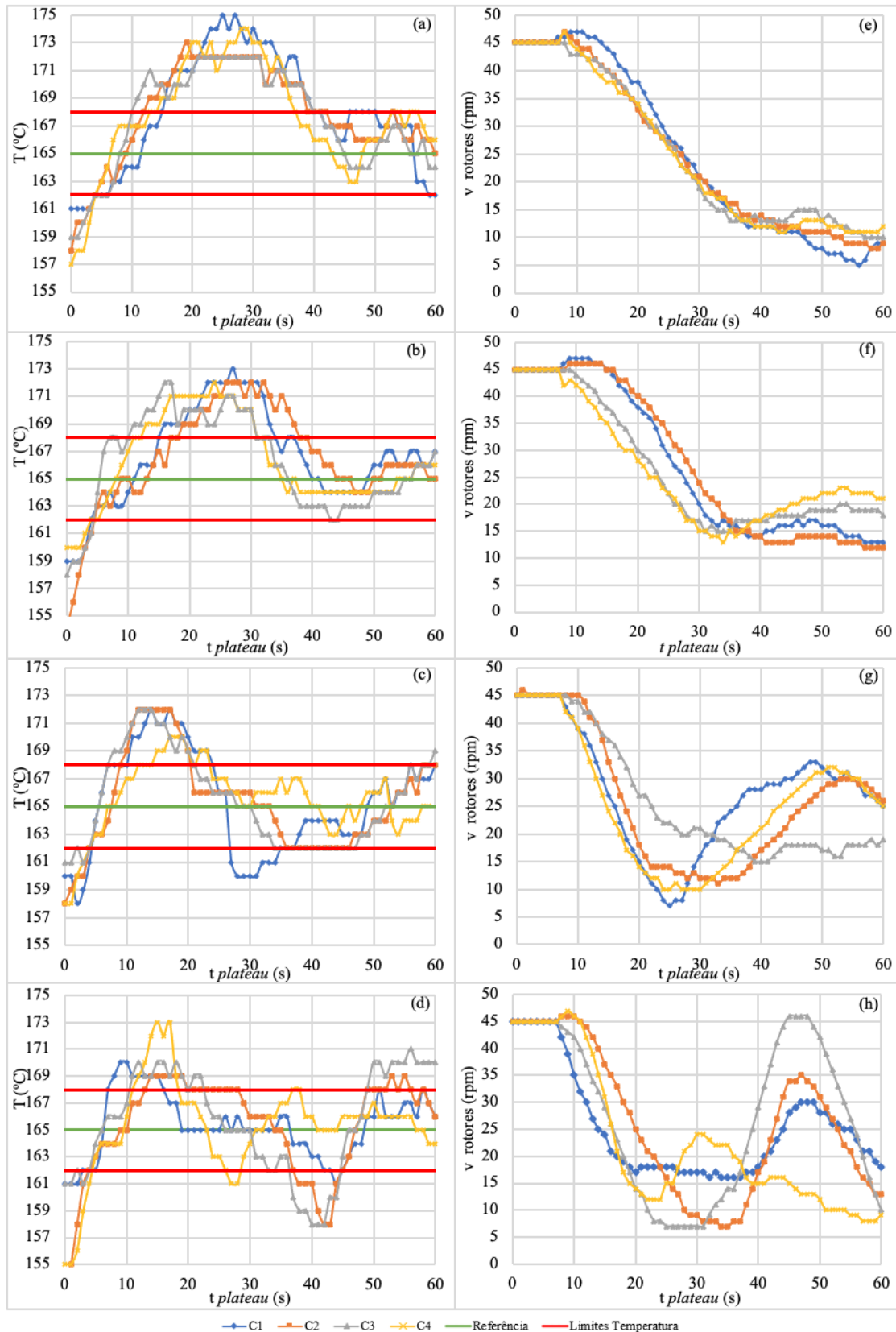


Figura 4.5: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_P=21$; $\tau_i=3,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (f) $K_P=21$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (c) e (g) $K_P=21$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (d) e (h) $K_P=21$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$.

Observando as curvas de temperatura da Figura 4.5, é notória a diferença das temperaturas máximas atingidas consoante os perfis utilizados. Assim, visualizando a Figura 4.5 (a) é perceptível que, estas curvas apresentam valores de temperatura máxima entre 172°C e 175°C, seguindo-se a Figura 4.5 (b) com valores entre 172°C e 173°C. Por outro lado, os perfis relativos às curvas da Figura 4.5 (c) e 4.5 (d), apresentam uma redução nas temperaturas máximas atingidas para valores de 170°C e 169°C, respetivamente.

Numa outra análise relativa ao tempo necessário para que a temperatura volte aos 165°C, após já ter atingido o tempo de subida, verifica-se que, a Figura 4.5 (a) apresenta valores entre os 40 e 50 segundos e, contrariamente, a Figura 4.5 (d) apresenta tempos no intervalo de 19 a 34 segundos, permitindo concluir que, quanto menor for temperatura máxima atingida menor é o tempo necessário para que a temperatura volte a atingir a referência. Para além do referido, é ainda possível constatar que, na Figura 4.5 (d), além de existir maiores oscilações nas respostas, também se observa, inicialmente, uma resposta rápida do processo que ao longo do tempo começa a ficar cada vez mais lenta e, isto pode explicar, o facto da temperatura ultrapassar os seus limites já no fim do passo em estudo.

Teoricamente, o tempo integral possui uma tendência para aumentar as oscilações do sistema e, portanto, à medida que se diminui este parâmetro o sistema, tendencialmente, vai reagir com uma maior rapidez e, conseqüentemente, ocorre um aumento das variações na variável manipulada. Pela observação da Figura 4.5 (e), para valores mais elevados de tempo integral, o sistema reage de forma mais lenta, o que significa oscilações mais suaves na velocidade dos rotores, implicando um maior aumento de temperatura, o que leva a maiores valores de *overshoot*. Em contrapartida, para valores mais baixos deste parâmetro, o sistema reage com uma maior rapidez, ocorrendo oscilações mais bruscas nos rotores, Figura 4.5 (h), não permitindo que o interior da câmara de mistura chegue a temperatura tão elevadas.

Após a obtenção das curvas de temperatura são retirados os valores dos tempos de subida e os valores de overshoot, sendo, posteriormente, reunidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Registo dos valores dos parâmetros de caracterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e overshoot, para os diferentes perfis em teste.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Cargas	t subida (s)	Overshoot (%)
7	11	2,5	0	1	12	6,1
				2	9	4,8
				3	7	5,5
				4	8	4,2
5	16	2,5	0	1	11	4,8
				2	9	4,2
				3	8	4,2
				4	6	4,2
8	21	2,5	0	1	6	4,2
				2	8	4,2
				3	7	3,0
				4	6	4,2
9	26	2,5	0	1	7	3,0
				2	9	2,4
				3	6	3,0
				4	10	4,8

Desta série de testes, observa-se pela Tabela 4.6 que os tempos de subida são bastante semelhantes de perfil para perfil, também pelo facto de o ganho proporcional possuir um valor fixo. Por outro lado, tal como se constatou experimentalmente, os valores de *overshoot* vão diminuindo ligeiramente à medida que o tempo integral vai sendo reduzido e, isto comprova-se pela Tabela 4.6, visto que, em termos médios, o perfil 7 apresenta um valor de *overshoot* de 5,2% e o perfil 9 apresenta um valor de 3,3%, o que significa que, há uma redução de 37% do perfil com maior tempo integral para o que apresenta menor tempo integral.

Após a conclusão do segundo conjunto de testes, é possível constatar que, os testes práticos apresentaram algumas discrepâncias. Por um lado, o perfil 9 cujo tempo integral é igual a 1 segundo apresenta os valores mais baixos de *overshoot*, por outro lado, possui valores superiores de tempos necessários para que a sua temperatura volte a alcançar 165oC, comparativamente com o perfil 8, tempo integral igual a 1,5 segundos. Apesar disso, e tendo em consideração o objetivo da presente dissertação, decidiu-se fixar a combinação de valores do perfil 9, com tempo integral igual 1 segundo, para tentar reduzir o ganho proporcional, de modo a suavizar as oscilações provocadas na velocidade dos rotores.

Seguindo as diretrizes gerais de sintonização dos controladores, os próximos testes são testes de ajuste, onde o objetivo passa por tentar diminuir o valor de ganho proporcional, obtendo resultados de igual modo satisfatórios. Para tal realizaram-se 20 cargas do composto B e na Tabela 4.7, é possível observar as cargas realizadas com determinados perfis de valores.

Tabela 4.7. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para uma série de testes de ajuste do ganho proporcional.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_d (s)	Nº Cargas	Composto	$t_{plateau}$ (s)
10	16	1	0	4	B	60
11	17	1	0	4		
12	18	1	0	4		
13	19	1	0	4		
14	20	1	0	4		

Como mostra a Tabela 4.7, cada perfil criado possui um valor diferente de ganho proporcional, para um tempo integral constante e igual a 1. Para esta série, aplicou-se uma sequência de valores relativamente ao ganho proporcional entre 16 e 20, utilizando um passo unitário.

Posteriormente à realização destes testes, concluiu-se que, em todos os perfis da Tabela 4.7, as respostas do sistema, ao nível das variáveis controlada e manipulada, foram bastante idênticas às respostas obtidas para o perfil 9 da Tabela 4.5. Por este motivo, os resultados não serão aqui apresentados, no entanto, encontram-se representados no Anexo D.

Ainda antes de se proceder à introdução do tempo derivativo, realizaram-se novos ajustes, onde se utilizou os dois valores mais baixos de tempo integral, aumentando, novamente, o ganho proporcional, uma vez que, os resultados mais satisfatórios foram obtidos nos perfis com maiores valores de ganho proporcional. Para tal, testaram-se mais quatro combinações distintas, que se encontram presentes na Tabela 4.8, para um total de 16 cargas de composto B, na tentativa de conseguir atingir uma melhor combinação de parâmetros proporcional e integral.

Tabela 4.8. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para uma série de testes de ajuste aos parâmetros proporcional e integral.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Nº Cargas	Composto	$t_{plateau}$ (s)
15	26	1,5	0	4	B	60
16	31	1,5	0	4		
17	26	1	0	4		
18	31	1	0	4		

No que diz respeito à serie de testes da Tabela 4.8, decidiu-se utilizar, novamente, os valores de tempo integral onde, anteriormente, foram obtidos os melhores resultados, ou seja, 1,5 e 1, e variar o valor de ganho proporcional para valores superiores, mantendo o valor de 26 e aplicando um passo idêntico ao aplicado no primeiro conjunto de testes, obtendo-se o valor de 31.

Para esta situação, extraíram-se os valores de temperatura e velocidade dos rotores e, seguiu-se com a construção das respetivas curvas, que estão representadas na Figura 4.6. Os valores extraídos encontram-se detalhados no Anexo D.

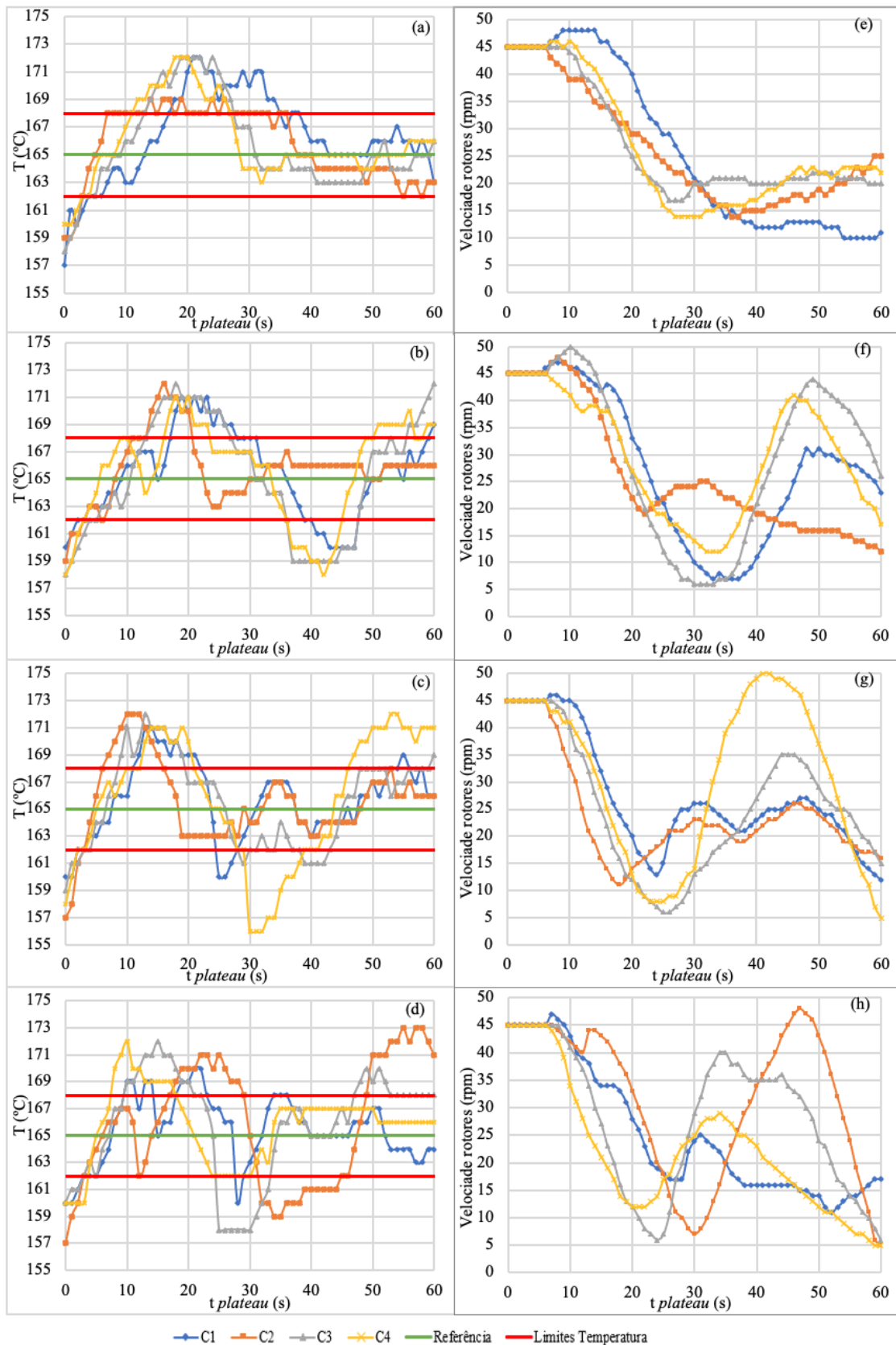


Figura 4.6: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_P=26$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (f) $K_P=31$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (c) e (g) $K_P=26$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (d) e (h) $K_P=31$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$.

Numa primeira análise à Figura 4.6 verifica-se que, os perfis 15 e 16, cujo parâmetro integral é igual a 1,5, Figura 4.6 (a) e (b), apresentam respostas com oscilações de temperaturas mais suaves. Em contrapartida, é notório que na Figura 4.6 (c) e 4.6 (d) existe uma maior oscilação nas respostas obtidas e, para além disso, as cargas do mesmo perfil possuem comportamentos bastante distintos entre si, o que leva a concluir que, existe uma certa diversidade nas respostas do sistema. No entanto, apesar da diversidade verificada na maior parte das cargas, confirma-se uma tendência idêntica, dado que, ao longo do tempo a reação do sistema torna-se cada vez mais lenta e, portanto, entre os 50 e 60 segundos é possível obter-se temperaturas superiores a 170°C. Esta situação pode ser, de certa forma, melhorada com o aumento do parâmetro integral.

Numa segunda análise, é possível concluir que, a Figura 4.6 (a) referente ao perfil 15, $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s, foi onde se obteve uma resposta mais suave e satisfatória tanto ao nível da temperatura como ao nível da velocidade dos rotores e, além disso, este apresenta um tempo de assentamento menor quando comparado com os restantes perfis. Relativamente aos parâmetros de caracterização de resposta destes testes decidiu-se não apresentar os seus valores em tabela, uma vez que, não vão ter qualquer influência na tomada decisão, pelo facto de existir uma grande oscilação nas respostas do sistema para os três perfis testados.

No que se refere à variável manipulada, é possível visualizar pela Figura 4.6 (e), que tal como previsto, o perfil 15 que possui as respostas mais suaves ao nível da temperatura é também o que apresenta menores variações na velocidade dos rotores. Relativamente ao perfil 18, Figura 4.12 (h), com maior ganho proporcional e menor tempo integral, é aquele onde se verifica as respostas mais oscilatórias mais elevadas e bruscas e, portanto, leva a concluir que, quanto maior é o ganho proporcional ou quanto menor é o tempo integral, maior são as oscilações verificadas na velocidade dos rotores.

Uma vez finalizados os ajustes, conforme indicam as diretrizes de sintonização, optou-se por escolher a combinação de valores aparentemente mais satisfatória, ou seja, o perfil que tem associado o ganho proporcional de 26 e o tempo integral de 1,5 segundos, para, de seguida, proceder-se à realização de um outro passo.

O passo seguinte diz respeito à introdução do tempo derivativo, sendo que, a sua adição pode ser realizada a partir do cálculo das estimativas iniciais, como mencionado no subcapítulo 3.2. Este parâmetro é, portanto, o último a ser adicionado e introduz uma capacidade antecipativa de corrigir o erro. Desta forma, decidiu-se efetuar o cálculo da respetiva estimativa inicial e aplicou-se, de seguida, uma sequência de valores para os quatro perfis criados, como se observa na Tabela 4.9.

O passo seguinte diz respeito à introdução do tempo derivativo, sendo que, a sua adição pode ser realizada a partir do cálculo das estimativas iniciais, como mencionado no subcapítulo 3.2. Este parâmetro é, portanto, o último a ser adicionado e introduz uma capacidade antecipativa de corrigir o erro. Desta forma, decidiu-se efetuar o cálculo da respetiva estimativa inicial e aplicou-se, de seguida, uma sequência de valores para os quatro perfis criados, como se observa na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para o terceiro conjunto de testes.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Nº Cargas	Composto	$t_{plateau}$ (s)
19	26	1,5	0,225	4	B	60
20	26	1,5	0,300	4		
21	26	1,5	0,375	4		
22	26	1,5	0,450	4		

Como mostra a Tabela 4.9, os perfis criados para este conjunto de testes práticos são os primeiros a conter valores para os três parâmetros de controlador PID. De salientar que, o valor de tempo derivativo obtido como estimativa inicial foi igual a 0,375 e, por esse motivo, estabeleceu-se um intervalo de valores próximo deste resultado. Para tal, aplicou-se uma sequência de valores com um passo de 0,075, sendo este o único parâmetro a variar no presente conjunto de testes.

Seguidamente, reuniram-se todos os valores necessários, que se encontram tabelados no Anexo E, e construíram-se as respetivas curvas de temperatura e velocidade, apresentadas na Figura 4.7.

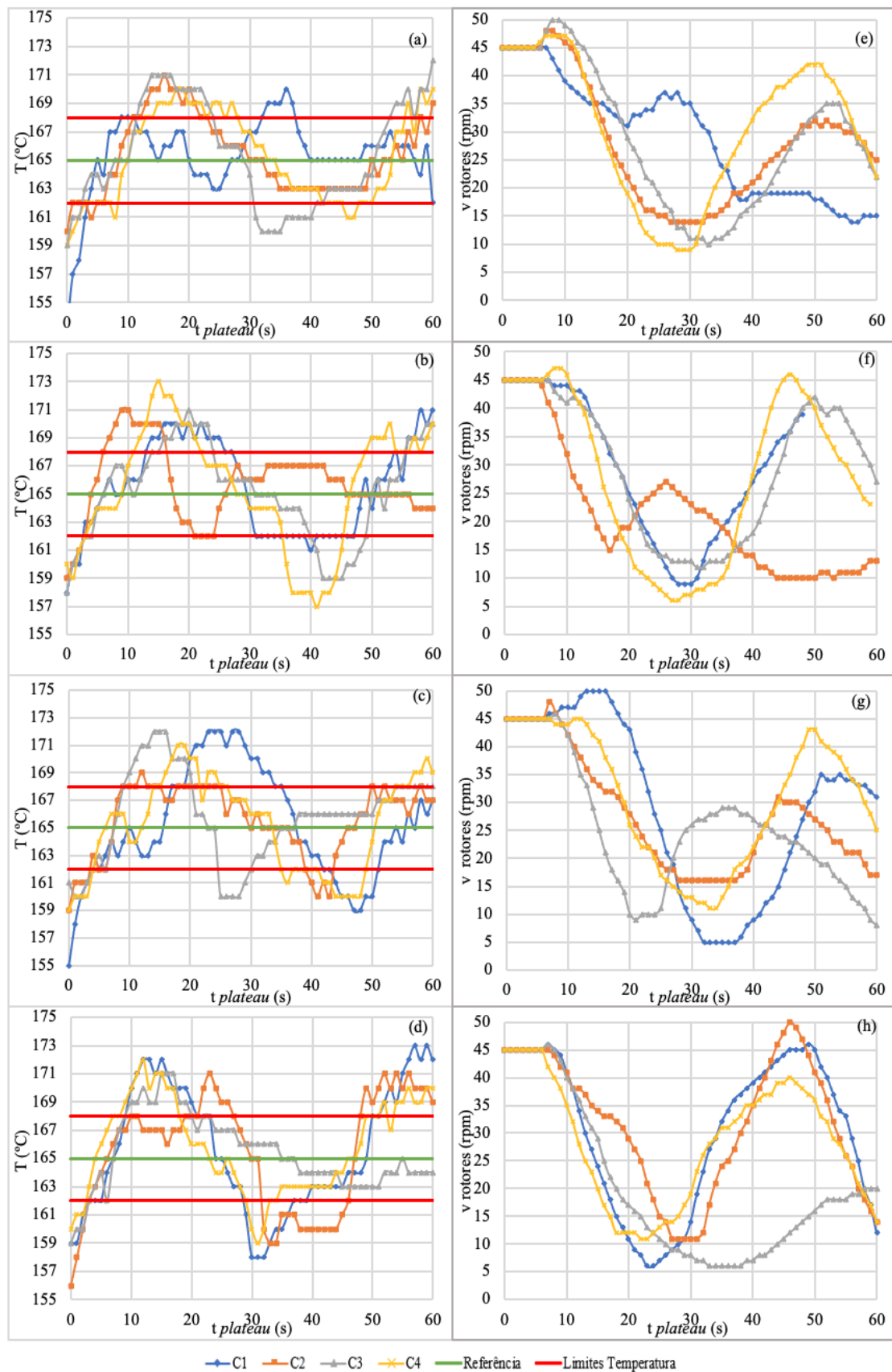


Figura 4.7: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $K_P=26$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$; (b) e (f) $K_P=26$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0,300 \text{ s}$; (c) e (g) $K_P=26$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0,375 \text{ s}$; (d) e (h) $K_P=26$; $\tau_i=1,5 \text{ s}$; $\tau_D=0,450 \text{ s}$.

Em relação à influência do parâmetro derivativo na variável controlada, verifica-se através da Figura 4.7 que, de uma forma geral, existe uma maior oscilação na resposta do sistema à medida que se aumenta o tempo derivativo, pois a representação gráfica que apresenta maiores oscilações na variável controlada é a Figura 4.7 (d) que, por consequência, provoca o aumento das temperaturas máximas atingidas. Por outro lado, a representação gráfica da Figura 4.7 (a) associada ao perfil 19, com tempo derivativo mais baixo, apresenta resultados com menores valores de *overshoot* e suas cargas exibem também um comportamento mais estável e idêntico entre si.

Além disso, observando as representações gráficas associadas à variação da velocidade dos rotores verifica-se que, para todos os perfis em análise existem grandes oscilações na variável manipulada. No entanto, à medida que se aumenta o tempo derivativo é perceptível que as variações na velocidade dos rotores tornam-se ainda mais elevadas e, isto é possível comprovar-se pela Figura 4.7 (h), onde o comportamento dos rotores sofre as maiores variações, dado o valor do tempo derivativo ser o mais alto relativamente à sequência de valores escolhida, o que causa uma maior rapidez nas respostas do sistema, acabando por provocar uma certa instabilidade no sistema.

Após a construção das curvas, extraíram-se os valores relativos ao tempo de subida e *overshoot* de cada carga efetuada e reuniram-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Registo de valores dos parâmetros de caracterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e *overshoot* para os diferentes perfis.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Cargas	t subida (s)	Overshoot (%)
19	26	1,5	0,225	1	5	3,0
				2	9	3,6
				3	10	3,0
				4	8	3,6
20	26	1,5	0,300	1	6	3,0
				2	4	3,6
				3	6	3,6
				4	9	4,8
21	26	1,5	0,375	1	10	4,2
				2	8	2,4
				3	8	4,2
				4	6	3,6
22	6	1,5	0,450	1	7	4,2
				2	6	3,6
				3	7	3,6
				4	4	4,2

Na Tabela 4.10 constata-se que, ao nível dos tempos de subida são poucas as diferenças observadas para os diferentes perfis. Por outro lado, analisando, de uma forma geral, os valores de *overshoot* da Tabela 4.10 conclui-se que, estes são também bastantes semelhantes, entre 3% a 4,2%, sendo que, de certo modo, é possível destacar-se o perfil 19, uma vez que, o *overshoot* em termos médios é relativamente inferior quando comparado com os restantes perfis testados.

Para demonstrar a importância do parâmetro derivativo, é essencial comparar a Figura 4.6 (a) com a Figura 4.7 (a), sendo possível concluir que, apesar do tempo derivativo introduzir uma maior oscilação nas respostas do sistema, tal como verifica na Figura 4.7 (a), ao nível dos parâmetros de caracterização, em concreto, tempos de subida e *overshoot*, apresenta valores mais próximos do objetivo final.

Assim sendo, a presença do tempo derivativo, no caso em específico, aparenta ser melhor na primeira metade do tempo de *plateau*, pois quando se procede à introdução desta ação o tempo de assentamento tende a aumentar, uma vez que, conforme se aumenta o tempo derivativo, a resposta do sistema torna-se mais oscilatória. No entanto, decidiu-se que os testes seguintes irão conter a ação derivativa.

Face a estes resultados, o perfil que apresenta a melhor combinação de valores até ao momento é o perfil 19, com $K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s, pois, foi onde se obteve os resultados, aparentemente, mais aceitáveis.

Finalmente, de acordo com as diretrizes gerias de sintonização de controladores, fixado o valor do parâmetro derivativo, é possível realizar mais alguns ajustes, no sentido de aumentar o parâmetro proporcional e, diminuir o tempo integral para um valor que cumpra a razão $\tau_i = 4 \tau_D$. Para tal, foram realizadas mais 32 cargas do composto B, cujos perfis utilizados se encontram na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Cargas realizadas e respetivas condições de realização para os testes de ajuste final dos parâmetros do controlador.

Perfil	K_P	τ_i (s)	τ_D (s)	Nº Cargas	Composto	$t_{plateau}$ (s)
23	26	1	0,225	4	B	60
24	30	1	0,225	4		
25	34	1	0,225	4		
26	28	1,5	0	4		
27	28	1,5	0,225	4		
28	28	1	0,225	4		
29	26	0,9	0,225	4		
30	28	0,9	0,225	4		

Como se pode visualizar pela Tabela 4.11, existem diversos ajustes no ganho proporcional e no tempo integral. Primeiramente, decidiu-se fixar o valor mais baixo do tempo derivativo, arredondar o valor do tempo integral para a razão referida acima, considerando o valor de 1 segundo e proceder ao aumento do ganho proporcional. De acordo com as tabelas de sintonização e com os valores testados anteriormente, o valor máximo admissível do ganho proporcional deste controlador é de 34 e, portanto, foi um dos valores escolhidos para serem testados. No entanto, também se decidiu testar valores entre 26 e 34, obtendo-se assim o perfil 23, 24, 25 e 28 da Tabela 4.11. Após a criação destes perfis e na tentativa de encontrar uma combinação mais satisfatória, escolheu-se testar algumas hipóteses diferentes de tempos integral e derivativo para um ganho proporcional de 28, criando assim os perfis 26 e 27 da Tabela 4.11. Finalmente, ainda

com o mesmo objetivo, experimentou-se testar os valores de ganho proporcional mais estáveis, com um valor exato de tempo integral, obtido da razão $\tau i = 4 \times 0,225$, mantendo o tempo derivativo constante, obtendo-se o perfil 29 e 30 da Tabela 4.11.

Seguidamente, reuniram-se todos os valores necessários, que se encontram tabelados no Anexo F, e construíram-se as curvas de temperatura e velocidade dos rotores. Na Figura 4.8, estão representadas as curvas em que se obtiveram os melhores resultados e controlador. Na Figura 4.8, estão representadas as curvas em que se obtiveram os melhores resultados e, portanto, as restantes curvas, referentes aos perfis 25, 26, 27 e 29 da Tabela 4.11, estão presentes no Anexo F.

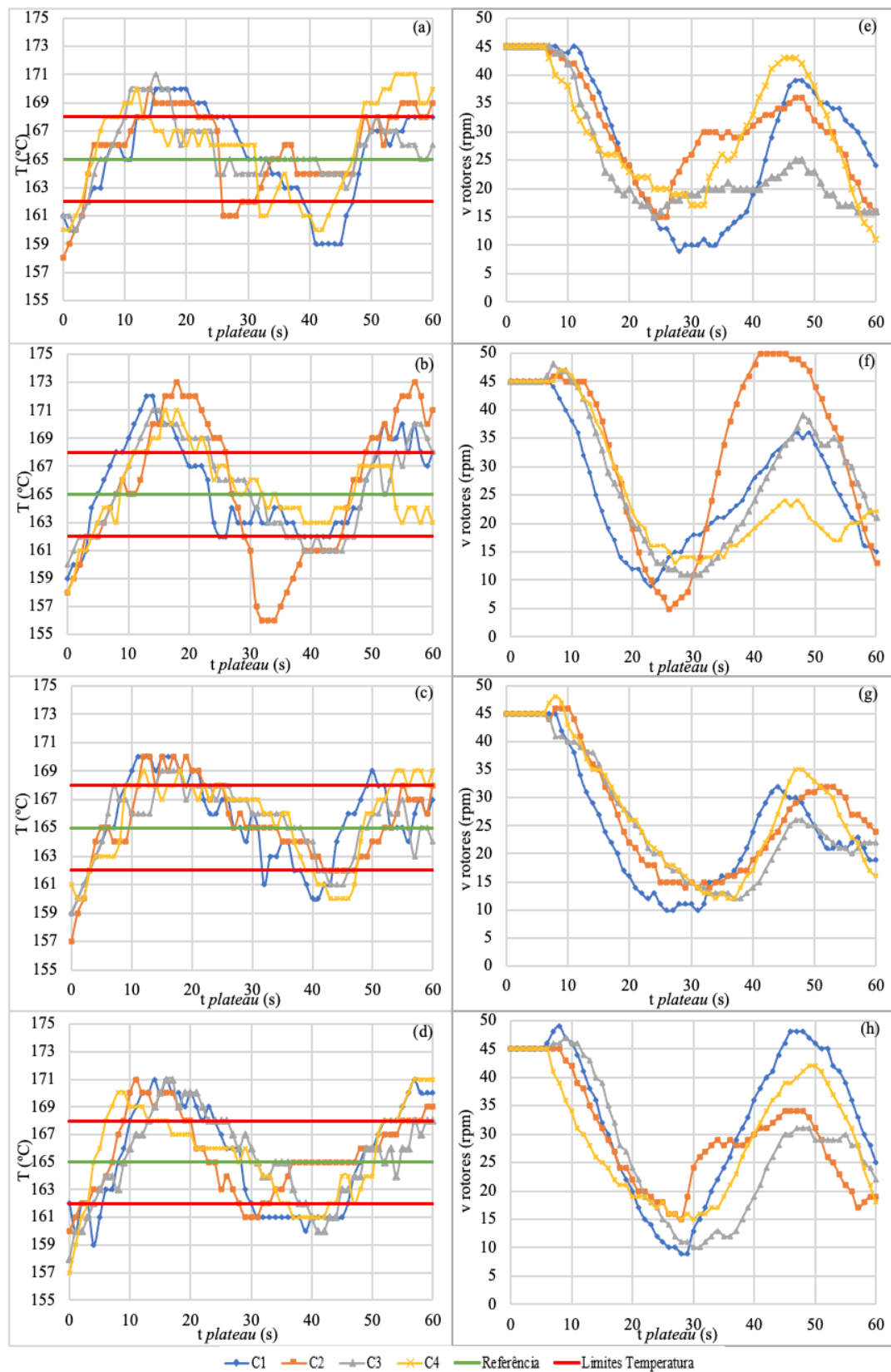


Figura 4.8: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador (a) a d)) e da velocidade dos rotores (e) a h)) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (e) $Kp=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s; (b) e (f) $Kp=30$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s; (c) e (g) $Kp=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s; (d) e (h) $Kp=28$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s.

De acordo com a Figura 4.8, é possível concluir que, para valores demasiado elevados de ganho proporcional, as respostas tornam-se bastante mais oscilatórias, como se comprova pela representação gráfica da Figura 4.8 (b). No entanto, para um valor de ganho proporcional intermédio, Figura 4.8 (b), as cargas de temperatura apresentam um comportamento mais idêntico, com valores de temperatura máxima mais baixos até ao momento, na ordem dos 170°C, Figura 4.8 (c). Por outro lado, mantendo este valor do parâmetro proporcional e diminuindo o tempo integral para o valor exato de 0,9 segundos, Figura 4.15 (d), as respostas mostram-se ser, novamente, mais oscilatórias.

Analisando as representações relativas à variação da velocidade dos rotores da Figura 4.8 constata-se que, os ensaios realizados com os valores mais elevados de ganho proporcional, Figura 4.8 (f) e com valores mais baixos de tempo integral, Figura 4.8 (h), causaram variações na velocidade dos rotores mais rápidas e bruscas, o que pode explicar então, o facto das respostas do sistema ao nível da temperatura serem mais oscilatórias, Figura 4.8 (b) e 4.8 (d). Por outro lado, os testes nos quais se obtiveram comportamentos mais idênticos e constantes ao nível da variável controlada, exibem, igualmente, variações na variável manipulada mais suaves, sendo possível de comprovar pelas cargas realizadas com o perfil da Figura 4.8 (g).

Tal como tem vindo acontecer, após a construção das curvas, extraíram-se os valores dos tempos de subida e *overshoot* de cada carga efetuada encontrando-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Registo de valores dos parâmetros de caracterização de resposta mais relevantes: tempo de subida e *overshoot* para os diferentes perfis.

Perfil	K_p	τ_i (s)	τ_D (s)	Cargas	t subida (s)	Overshoot (%)
23	26	1	0,225	1	7	3,0
				2	5	3,0
				3	6	3,6
				4	5	2,4
24	30	1	0,225	1	5	4,2
				2	8	4,8
				3	8	3,6
				4	9	3,6
28	28	1	0,225	1	6	3,0
				2	5	3,0
				3	6	2,4
				4	9	2,4
30	28	0,9	0,225	1	8	3,6
				2	7	3,0
				3	9	3,6
				4	4	3,0

Observando a Tabela 4.14, verifica-se que os tempos de subida não são muito relevantes, uma vez que, são todos inferiores a 10 segundos e são também bastante idênticos. Por outro lado, ao nível dos valores de *overshoot* é visível que, o perfil 28, com a combinação de valores de $K_p=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s, apresenta valores de *overshoot* entre 2,4% a 3% e, portanto, comprova-se o que foi dito anteriormente. De facto, o perfil 28 aquele onde se obteve valores de temperatura máxima mais próximos de conseguirem ficar dentro dos limites de temperatura estabelecidos.

Tendo em consideração todos os testes até aqui realizados, e comparando os testes práticos da Figura 4.4 (a) com os da Figura 4.8 (c), verifica-se uma grande diferença relativamente ao comportamento da temperatura, uma vez que, o perfil que se encontra, atualmente, em utilização, possui um tempo de subida médio de 7,6 segundos, sendo que, após a passagem pela temperatura de referência, as cargas atingem temperaturas máximas na ordem dos 173°C, correspondendo a um *overshoot* médio de 4,8% e, de seguida, estão praticamente todo o tempo fora dos limites de temperatura estabelecidos. Contrariamente, o perfil 28, apresenta uma menor oscilação nas respostas, com um tempo de subida médio de 6,5 segundos, com um *overshoot* médio de 2,7%, ou seja, as cargas realizadas apresentam uma temperatura máxima de 170°C, o que significa que, na grande maioria do tempo, foi atingível manter as cargas realizadas dentro dos limites de temperatura estabelecidos.

Em suma, conclui-se que o perfil cuja combinação de valores é $K_p=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s, foi aquele que apresentou os melhores resultados e, por consequência, será esta a combinação de valores a ser testada noutros compostos de produção normal.

4.4 Validação da Combinação Escolhida

Numa segunda fase do trabalho experimental foi pertinente aplicar a combinação de valores escolhida na receita de vários compostos de produção normal, de modo a obter um termo de comparação entre o perfil utilizado pela empresa e o perfil sugerido na presente dissertação.

Deste modo, foram escolhidos alguns compostos de sílica que são, habitualmente, produzidos no misturador 10 e procedeu-se há alteração das suas receitas, introduzindo os novos valores propostos dos parâmetros de controlo. Após a produção destes, realizou-se o levantamento e a análise de resultados, através do sistema MMS e, em seguida, comparou-se com os resultados obtidos antes de ocorrer esta alteração. Resumidamente, a Tabela 4.13 mostra todos os testes que foram realizados nesta fase do trabalho experimental.

Tabela 4.12. Compostos testados com o perfil 2 e o perfil 28, após a alteração dos parâmetros do controlador e respetivas condições.

Composto	Perfil 2			Perfil 28	
	Nº cargas	Passo <i>plateau</i>	Restrição na velocidade rotores [rpm]	Nº cargas	Passo <i>plateau</i>
B	12	Passo 8 Passo B2	[10-25] [10-25]	12	Passo 8 Passo B2
C	12	Passo 8 Passo B2	[5-25] [10-30]	12	Passo 8 Passo B2
D	12	Passo 8 Passo B2	[10-25] [10-25]	12	Passo 8 Passo B2
E	12	Passo 8 Passo B2	[10-40] [10-40]	12	Passo 8 Passo B2
F	12	Passo 8 Passo B2	[10-25] [10-25]	12	Passo 8 Passo B2

Em primeiro lugar, é importante referir que, tal como se verifica na Tabela 4.13, realizaram-se 12 cargas exemplificativas de cada composto recorrendo ao perfil 28, cuja combinação de valores é de $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s. Seguidamente, estas cargas podem ser comparadas com cargas que foram realizadas antes de qualquer tipo de alteração, ou seja, cargas efetuadas com o perfil 2 ($K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s) associado. Além disso, para as cargas realizadas com o perfil 2 é possível observar, através da Tabela 4.13, a restrição imposta na velocidade dos rotores para cada um dos compostos. No presente subcapítulo serão apresentados os resultados dos compostos B, C e E, sendo que, não foram conseguidos estes resultados para todos os compostos, no entanto, com os novos valores dos parâmetros, os resultados foram significativamente melhores. Assim, os resultados dos restantes compostos podem ser encontrados no Anexo G.

Por outro lado, tendo em consideração que o misturador onde estão a ser realizados os testes é do tipo *tandem*, cujo o objetivo é a otimização do tempo, a reação de silanização nestes compostos divide-se em dois passos de *plateau*, como se observa na Tabela 4.13, ou seja, a carga inicia o *plateau* no misturador superior (Passo 8) e continua a ser realizada no misturador inferior (Passo B2), enquanto que, no primeiro entra uma nova carga. Por esse mesmo motivo, torna-se importante, também analisar a fase de *plateau* no misturador inferior, visto que, este também possui um controlador PID.

Inicialmente, prosseguiu-se com a modificação dos parâmetros de controlo no composto B, uma vez que, este serviu de base para o estudo dos parâmetros do controlador que culminaram na escolha do perfil 28. Deste modo, torna-se pertinente analisar as diferenças ocorridas.

O composto B é um composto de sílica sendo essencial existir um controlo de temperatura, que no caso em específico, trata-se de atingir e manter uma temperatura igual a 165°C com um desvio de $\pm 3^\circ\text{C}$. A Figura 4.9 representa os resultados obtidos relativamente ao comportamento da temperatura das cargas e às variações ocorridas na velocidade dos rotores, para a primeira etapa de *plateau* do composto B com duração de 10 segundos, antes e após alteração dos parâmetros do controlador.

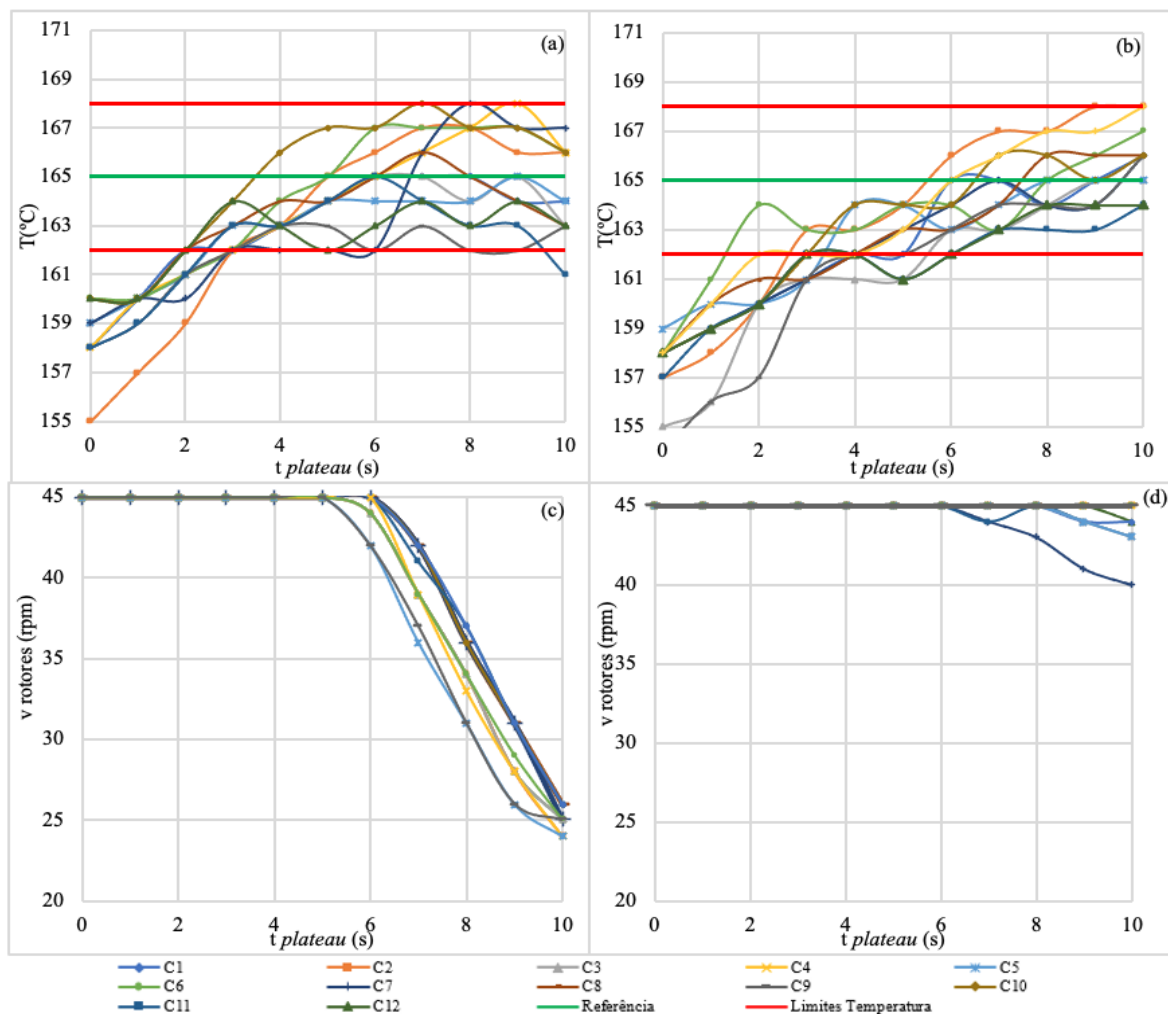


Figura 4.9: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente:
(a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$.

Por um lado, o facto do misturador superior ter um tempo de *plateau* de apenas 10 segundos torna complexo analisar o comportamento real do controlador à alteração dos seus parâmetros. Ao observar a Figura 4.9 (a) e 4.9 (b), é evidente que a temperatura só atinge o valor de referência ao fim de 6 segundos, em termos médios e, por consequência, o restante espaço temporal é mínimo, não sendo possível retirar grandes conclusões, visto que, o comportamento da temperatura das cargas é similar antes e após a alteração dos parâmetros, com valores de temperatura máxima iguais.

Por outro lado, relativamente à variável manipulada, já se verificam algumas diferenças. Antes da alteração dos parâmetros, Figura 4.9 (c), existe uma restrição na velocidade dos rotores, tal como mencionado na Tabela 4.13, quer isto dizer que, quando a temperatura atinge a referência, a variável manipulada cai, obrigatoriamente, para um valor de 25 rotações por minuto, não permitindo que a temperatura atinja valores tão elevados, logo permite o cumprimento dos limites estabelecidos. Em relação à velocidade dos rotores da Figura 4.17 (d), o intervalo de valores está aberto e, desta maneira, a variável manipulada não é obrigada a baixar tanto a sua velocidade.

Quanto ao segundo passo do *plateau*, este possui uma duração de 70 segundos com uma temperatura pretendida de $157^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Na Figura 4.10 está representado o comportamento do sistema ao nível da temperatura das cargas e da velocidade dos rotores.

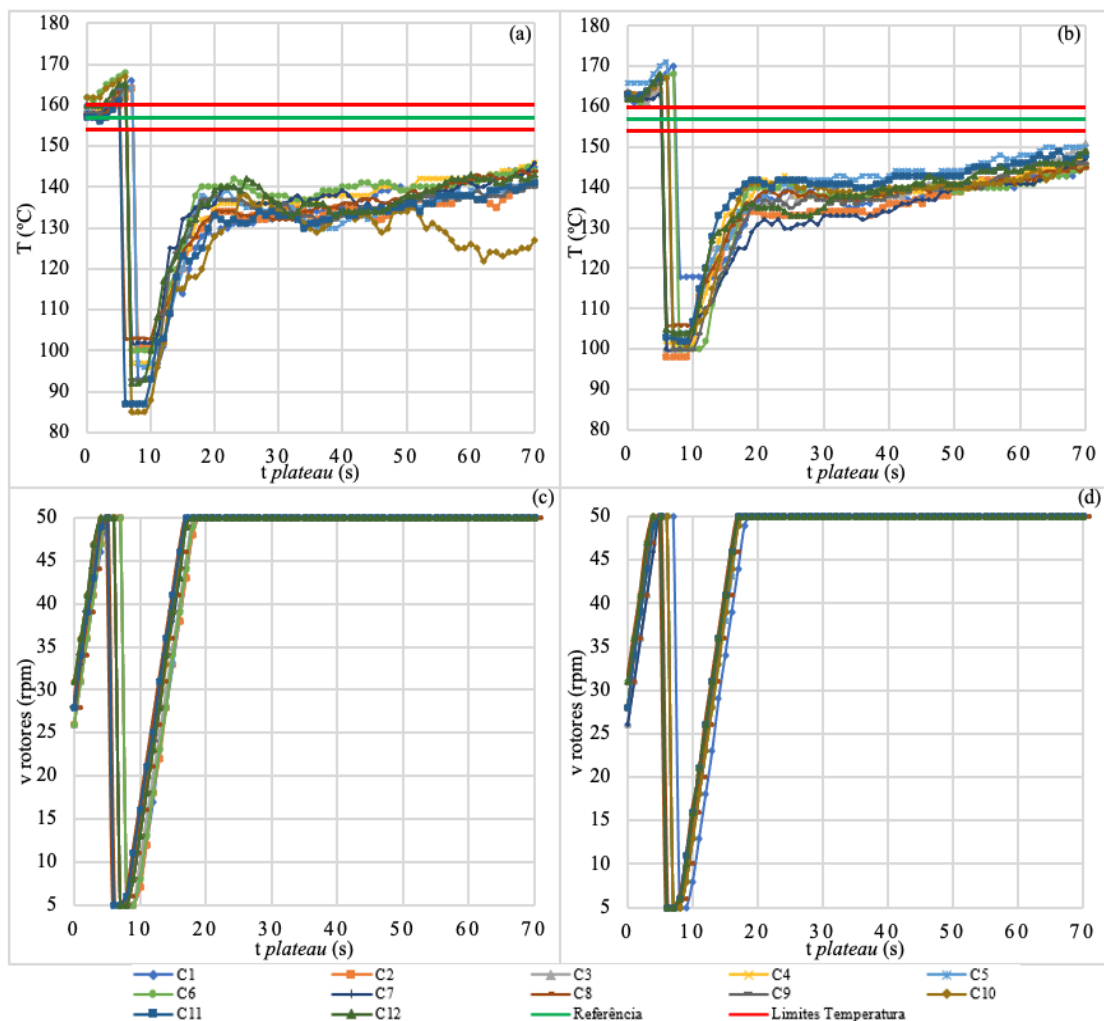


Figura 4.10: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s.

De acordo com a Figura 4.10 é visível que, em ambos os casos, as cargas efetuadas não foram capazes de chegar à temperatura pretendida. Na verdade, como se comprova pela Figura 4.10, este exemplo de composto não é o melhor, uma vez que, não tem a capacidade de atingir a temperatura definida na receita. Isto pode ser explicado, pelo facto de o misturador inferior não possuir um martelo pneumático que ajude na integração da borracha aos rotores ou, pelo facto de a composição do próprio composto dificultar a sua

aderência aos rotores que, conseqüentemente, provoca a diminuição da sua temperatura. No entanto, com a alteração efetuada aos parâmetros do controlador, é possível observar uma aproximação da temperatura das cargas à temperatura de referência pois, para a Figura 4.10 (a) obteve-se temperaturas máximas de 142°C e, no caso da Figura 4.10 (b) foi possível atingir temperaturas de 149°C, o que significa que há um aumento de 7°C da temperatura relativamente aos resultados obtidos com o perfil em utilização. Apesar deste composto não conseguir atingir a temperatura pretendida, é dada bastante mais importância à temperatura atingida na primeira etapa de *plateau*, visto ser nesta que ocorre o início da reação de silanização.

Numa segunda fase, realizaram-se mais testes práticos onde se procedeu à alteração da receita noutro composto de sílica, composto C da Tabela 4.13. Na Figura 4.11, é possível observar o comportamento do sistema, antes e após alteração dos parâmetros de controlo, relativamente às variáveis controlada e manipulada na primeira câmara de mistura cuja duração é de 30 segundos e a temperatura pretendida é igual a 165°C.

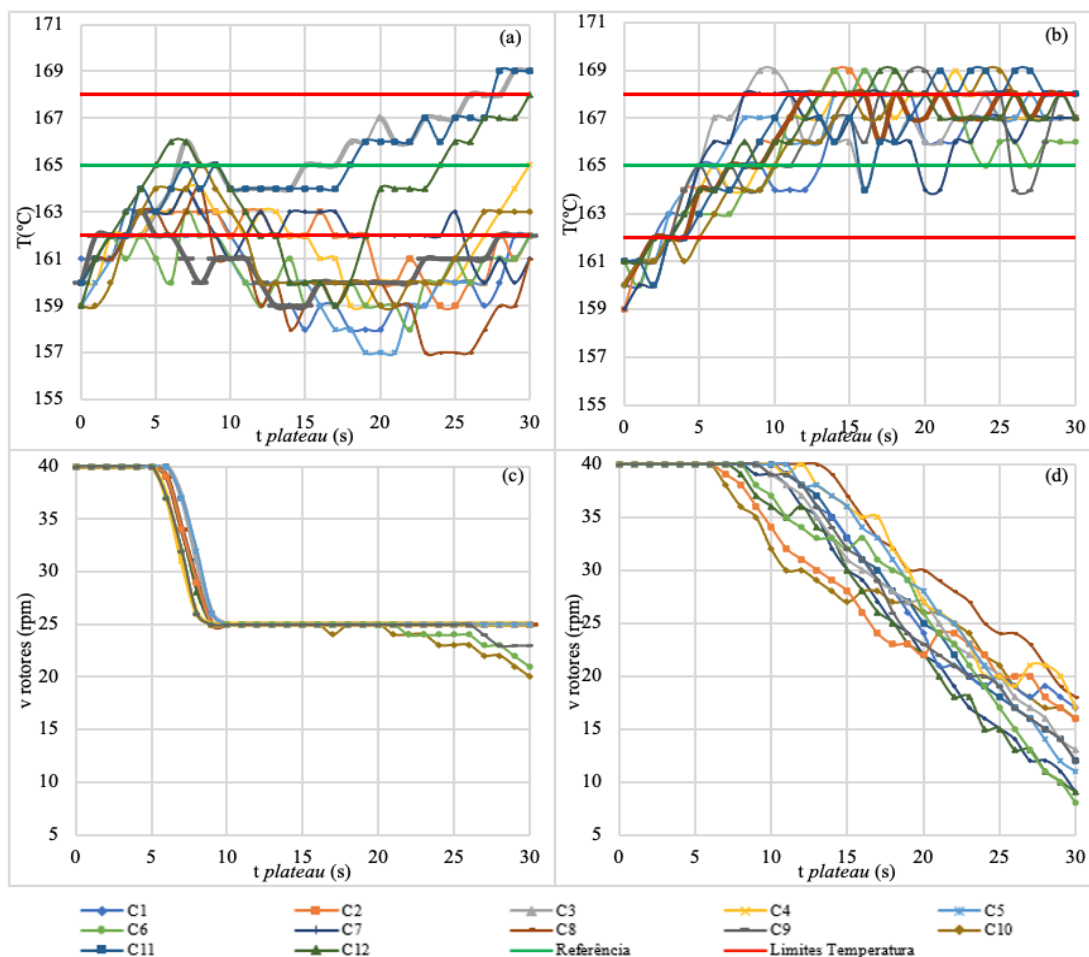


Figura 4.11: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$.

Quanto à produção normal do composto C, Figura 4.11(a) e 4.11(c), tal como acontece para os outros compostos, existe uma restrição na velocidade máxima permitida para os rotores, o que significa que, quando a variável manipulada começa a reagir desce até ao valor máximo de 25 rotações por minuto, como se constata na Figura 4.11(c).

Consequentemente, esta restrição afeta o comportamento da temperatura das cargas do composto C, uma vez que, muitas destas cargas não são capazes de aumentar a temperatura e, portanto, não alcançam o valor final pretendido, como se verifica na Figura 4.11(a). Para além disso, em muitos casos, não cumprem os limites inferiores de temperatura estabelecidos, o que pode dificultar a ocorrência da reação de silanização.

Em relação à situação após alteração dos parâmetros verifica-se que, as respostas do sistema são mais satisfatórias, pois como se observa na Figura 4.11 (d), a velocidade desce de uma forma mais lenta permitindo que as cargas mantenham a temperatura próximo do valor de referência. Assim, estas tornam-se capazes de atingir a temperatura de referência ao fim de 10 segundos e permanecer, grande parte do tempo, dentro dos limites de temperatura estabelecidos, tal como mostra a Figura 4.11 (b), garantindo a ocorrência da reação de silanização. Comparando os dois perfis, torna-se perceptível que os parâmetros estudados na presente dissertação, originaram um melhor desempenho do sistema.

Após a descarga do misturador superior para o inferior, inicia-se o segundo passo de *plateau* com duração de 60 segundos e com uma temperatura pré definida de 161°C. Na Figura 4.12 é possível mostrar as curvas de temperatura com as respetivas curvas de velocidade dos rotores para a segunda etapa de *plateau*, antes e após a alteração dos parâmetros do controlador.

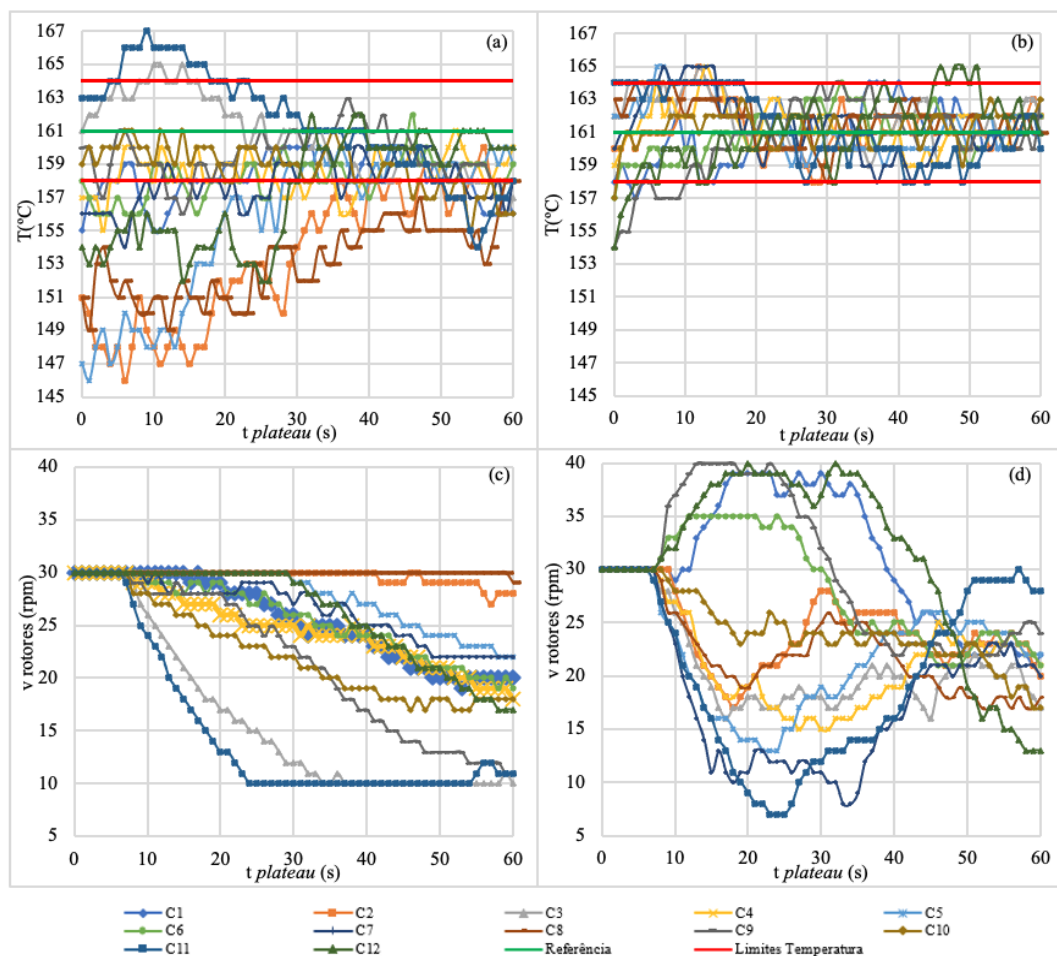


Figura 4.12: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s.

Através da análise da Figura 4.12 é evidente que, também neste passo, o desempenho do sistema é mais eficaz após a alteração dos parâmetros do controlador. Analisando a Figura 4.12(a) verifica-se que, existe uma grande diversidade nas respostas do sistema pois, cada carga possui um determinado comportamento, ou seja, algumas cargas analisadas cumprem, minimamente, os limites estabelecidos, outras não chegam à temperatura exigida como limite inferior e outras ainda ultrapassam o limite de temperatura máxima definida. De notar que, o comportamento de cada carga é bastante influenciado pela temperatura a que essa mesma carga entra no passo de *plateau*. Sem esquecer que, tal como aconteceu em algumas cargas do passo 8, o facto de muitas cargas não atingirem valores de temperaturas suficientes acontece devido à existência de uma restrição nos intervalos de valores na variável manipulada, como se verifica na Figura 4.12 (c).

Quanto aos resultados obtidos após a alteração dos parâmetros, verifica-se uma maior estabilidade nas respostas pois, como representado na Figura 4.12 (b), as respostas do sistema são bastante satisfatórias e cumprem, na maioria do tempo, os limites de temperatura impostos.

Finalmente, analisou-se os resultados obtidos para o composto E da Tabela 4.13. De seguida, na Figura 4.13 apresentam-se os resultados do comportamento do sistema ao nível da variável controlada e manipulada, antes e após alteração dos parâmetros de controlo na receita, para a primeira etapa de *plateau* cuja duração é de 30 segundos e a temperatura definida é igual a 165°C, como representado na Figura 4.13.

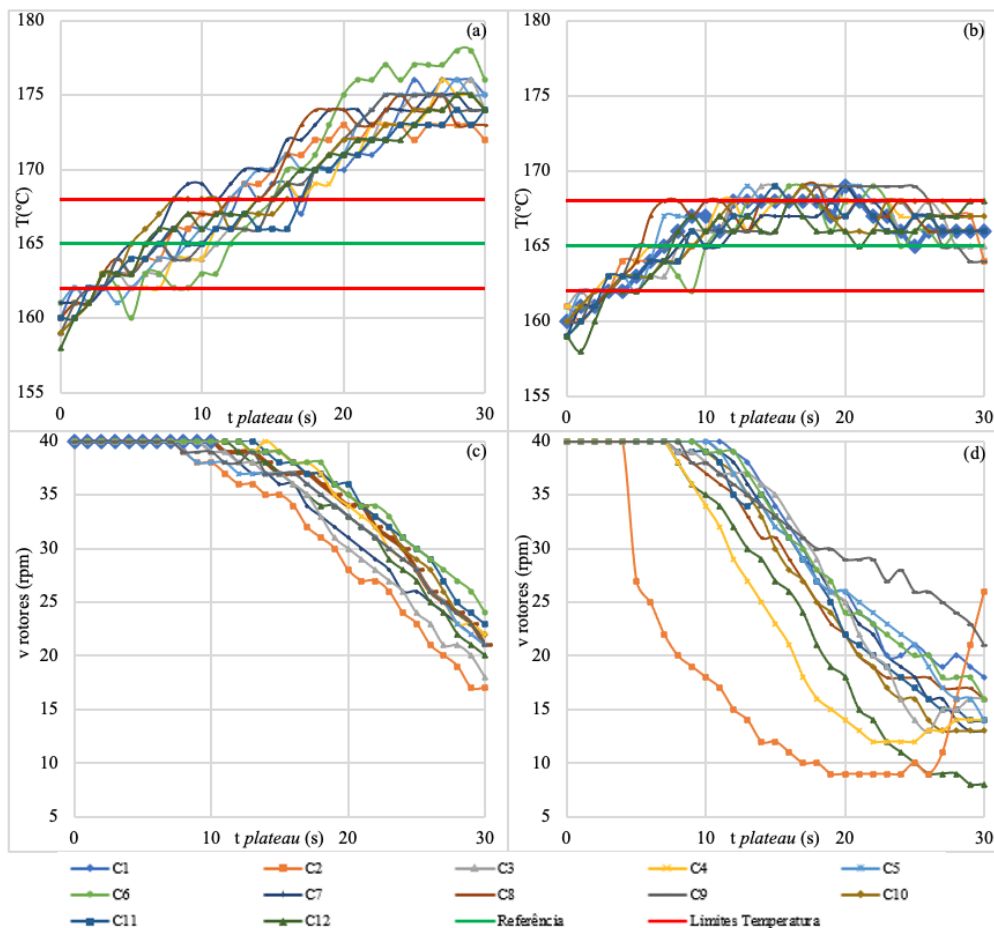


Figura 4.13: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo de plateau para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$.

Relativamente aos resultados obtidos para o composto E, analisando a Figura 4.13 é possível verificar que, existe uma grande disparidade entre as duas situações, visto que, antes de ocorrer a alteração dos parâmetros, as cargas efetuadas apresentam uma tendência para aumentar a sua temperatura até valores próximos de 175°C , como se observa na Figura 4.13 (a), sendo que, a variável manipulada apresenta uma restrição de valores entre 10 a 40 rotações por minuto, como se constata pela Figura 4.13 (c).

Contrariamente, após alteração dos parâmetros, verifica-se, através da Figura 4.13 (d), a existência de maiores oscilações na velocidade dos rotores e, em algumas cargas, a velocidade dos rotores desce a valores próximos de 5 rotações por minuto, não permitindo que temperatura atinja valores tão elevadas. Por esse motivo, a resposta do sistema ao nível da temperatura é bastante satisfatória, com tempos de subida inferiores a 10 segundos e temperaturas máximas de 169°C , como se constata na Figura 4.13 (b).

Seguidamente, é efetuada a descarga para do misturador superior para o inferior e, inicia-se então o segundo passo de *plateau* com duração de 50 segundos e uma temperatura pretendida de 165°C . Na Figura 4.14 é possível mostrar as curvas de temperatura com as respetivas curvas de velocidade dos rotores para o segundo passo de *plateau*, antes e após a alteração dos parâmetros.

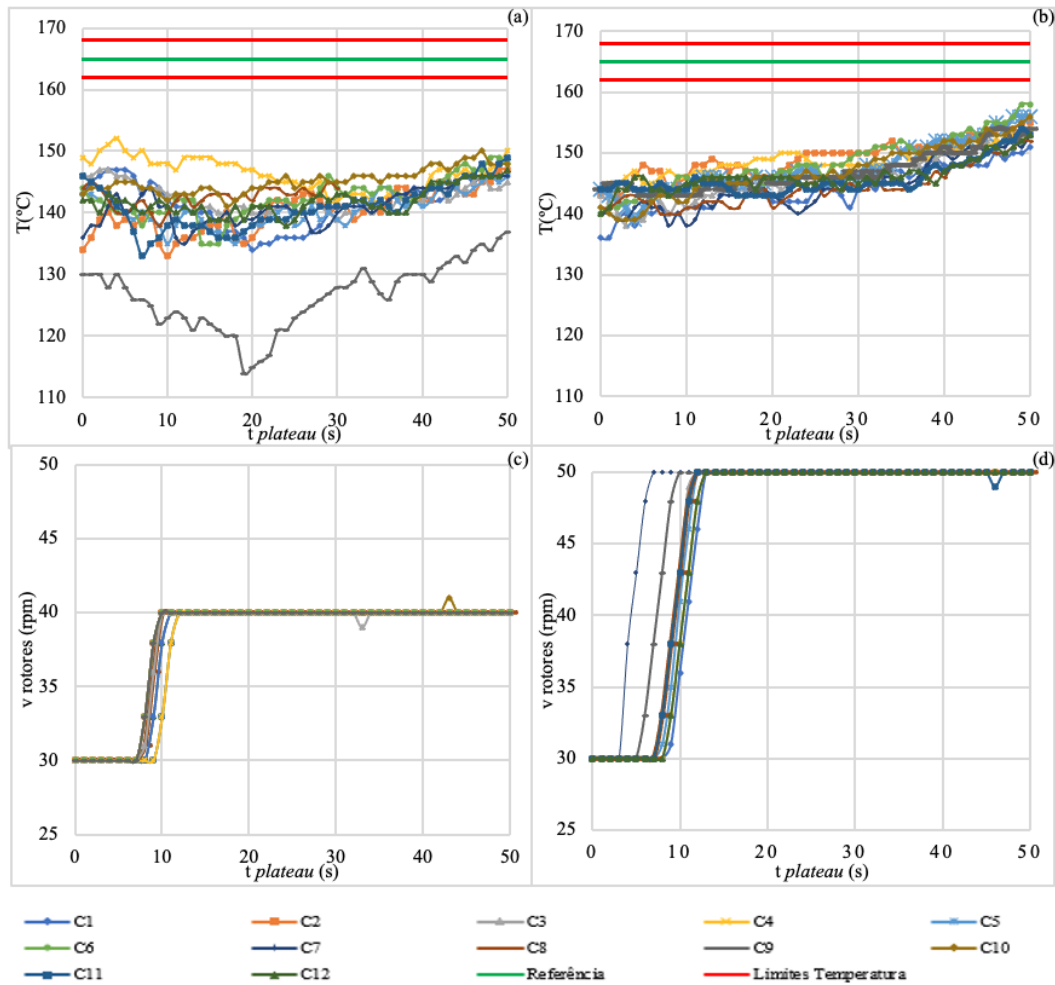


Figura 4.14: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$.

Observando a Figura 4.14 é possível afirmar que, de todas as cargas realizadas nenhuma alcançou o valor de temperatura definido na receita do composto, tal como acontece no primeiro composto analisado, composto B. No entanto, para a situação de produção normal, uma vez que, existe uma restrição na velocidade dos rotores, entre 10 e 40 rotações por minuto, Figura 4.14 (c), não é possível que a temperatura das cargas aumente até ao valor pretendido de 165°C e, tal como se observa na Figura 4.14 (a), a temperatura máxima atingida é de 148°C . Por outro lado, após alteração dos parâmetros do controlador e abertura do intervalo de valores da velocidade dos rotores, é evidente uma aproximação da temperatura das cargas com a temperatura de referência, atingindo valores máximos de 158°C , como se visualiza pela Figura 4.14 (b), o que significa um aumento de 10°C relativamente à situação de produção normal. Este aumento de temperatura pode ser explicado, pelo facto de não existir qualquer restrição na velocidade dos rotores, o que permite que os rotores aumentem a sua velocidade até ao valor máximo de 50 rotações por minuto, Figura 4.14 (d).

Para este composto é possível concluir que, os novos parâmetros escolhidos para o controlador originam um melhor desempenho do sistema.

De notar que, toda esta análise realizada foi possível através da extração de valores dos gráficos obtidos no sistema do MMS e, portanto, a título exemplificativo, encontram-se no Anexo H as curvas retiradas diretamente do MMS, para o perfil utilizado pela empresa e para o perfil com a combinação de valores final.

Em suma, avaliando os resultados e os parâmetros de caracterização dos diversos testes realizados, chegou-se sempre ao mesmo resultado, ou seja, os novos valores dos parâmetros escolhidos originam resultados mais satisfatórios comparativamente aos valores dos parâmetros em utilização pela empresa.

5 Conclusão e Sugestões de Trabalhos Futuros

A presente dissertação teve como principal objetivo a otimização do controlo da temperatura durante a etapa de mistura, através do estudo e implementação de novos valores para os parâmetros do controlador PID, ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo. Deste modo, reduzir a amplitude de variação da temperatura durante a reação de silanização e, consequentemente permitir a redução das propriedades físicas e viscoelásticas dos compostos.

Inicialmente, avaliou-se a situação atual do controlador, através da realização de alguns testes que permitiram analisar as combinações que já existiam no sistema do MMS. É importante referir que, para facilitar a análise dos testes práticos, decidiu-se ter em consideração duas características que permitem descrever a resposta do sistema, o tempo de subida e o overshoot, sendo que, o objetivo dos testes passa por diminuir ambas as características, tendo sempre em conta o compromisso existente entre a otimização da temperatura e as oscilações mínimas na velocidade dos rotores. Com base nesta análise, o perfil 2 com a combinação de valores de $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s, apresenta resultados mais satisfatórios, com valores de *overshoot* entre 4,2% e 7,3%, o que significa uma diminuição entre 7,6% e 31,2% relativamente aos valores de *overshoot* dos outros perfis existentes. Por este motivo, os testes práticos foram baseados neste perfil.

Seguidamente, realizaram-se mais testes com a finalidade de atingir o melhor desempenho possível do sistema de controlo. Para isso, foi necessário recorrer a um processo iterativo, uma vez que, o sistema implementado apresenta uma enorme complexidade, não sendo assim possível através de nenhum método de sintonização calcular as estimativas iniciais dos parâmetros do controlador PID.

Assim, em primeiro lugar foi importante estudar o efeito do ganho proporcional na resposta do processo concluindo que, para valores superiores do ganho proporcional, o controlador reage de forma mais rápida e, por consequência, permite que a temperatura atinja o valor de referência também mais rapidamente. Em segundo lugar, avaliou-se a influência do tempo integral chegando à conclusão que, quanto menor é o seu valor, menor é a temperatura máxima atingida, portanto, menor é o valor de *overshoot*. Em terceiro e último lugar, após a realização de alguns testes de ajustes, procedeu-se à introdução do tempo derivativo, onde foi possível concluir que à medida que se aumenta o valor do tempo derivativo existe uma maior oscilação na resposta do sistema.

Após a realização dos vários testes, o perfil 28 cuja combinação de valores é $K_P=28$, $\tau_i=1$ s, $\tau_D=0,225$ s, foi aquele que, de todos apresentou os resultados mais satisfatórios. Além disso, é notória uma enorme discrepância entre os resultados obtidos com o perfil 28 e com o perfil 2 utilizado na empresa. Por um lado, o perfil 2 com a combinação de valores de $K_P=11$, $\tau_i=2,5$ s, $\tau_D=0$ s, possui um tempo de subida médio de 7,6 segundos, sendo que, após a passagem pela temperatura de referência, as cargas atingem temperaturas máximas entre 172°C e 174°C, correspondendo a valores de *overshoot* entre 4,2% e 5,4%. De seguida, as cargas permanecem praticamente todo o tempo fora dos limites de temperatura estabelecidos. Por outro lado, o perfil 28 apresenta uma maior estabilidade nas respostas, com um tempo de subida médio de 6,5 segundos, apresentando uma temperatura máxima de 170°C, ou seja, verificam-se melhorias significativas nos valores de *overshoot* variando entre 2,4% e 3,03%, o que significa uma diminuição de 43% relativamente aos valores de *overshoot* do perfil original.

Foram, ainda, efetuados diversos testes experimentais para ser possível a comparação entre os resultados obtidos com os parâmetros originais e com os novos parâmetros desenvolvidos ao longo deste trabalho. Em suma, avaliando os resultados e os parâmetros de caracterização destes mesmos testes, conclui-se que, os novos valores dos parâmetros escolhidos originam um melhor desempenho do sistema comparativamente com os valores dos parâmetros em utilização pela empresa.

Como proposta para a continuação futura deste trabalho, sugere-se prosseguir com a realização de mais testes práticos com os respetivos ajustes necessários nos diferentes parâmetros de controlo, por forma a melhorar o enquadramento dos resultados nos limites de temperatura estabelecidos.

Por outro lado, para melhoria dos resultados obtidos, seria conveniente ao nível da receita, e para cada composto de produção normal, efetuar alguns ajustes, nomeadamente, ao nível dos intervalos de valores da velocidade dos rotores e, também ao nível da temperatura a que as cargas entram no passo de *plateau*, uma vez que, essa temperatura terá bastante influência na atuação do controlador.

Bibliografia

- Assystem. (2022). Obtido em fevereiro de 2022, de <https://www.assystem.com/en/offers/instrumentation-and-control-systems/>
- Brito, L. V. (2011). Organização da produção através da aplicação de ferramentas lean manufacturing numa empresa de produção de pneus. Universidade do Minho.
- Britto, H. (outubro de 2015). Extrusão plástica. Obtido em novembro de 2021, de Mecânica de Fabricação: conceitos, elementos e processos: <http://mecanicadefabricar.blogspot.com>
- Caetano, M. (2010). Finalidade da Operação de Mistura. Obtido em novembro de 2021, de CTB: <https://www.ctborracha.com/processos/mistura/finalidade-da-operacao-de-mistura/>
- Carvalho, M. S. (2017). Caracterização reológica de compostos de borracha no processo de extrusão por DMA. Universidade do Porto.
- Catim. (2021). Ampliação da Continental Mabor- Projeto 20 Estudo do Impacto Ambiental. Vila Nova Famalição.
- Continental AG. (30 de novembro de 2018). Formação- Nível Básico. Noções básicas de pneus para veículos de passageiros. Lousado, Vila Nova Famalição.
- Continental AG. (2021). Obtido de Sobre Mabor: <https://www.mabor.pt/ligeiros/the-brand>
- Continental Mabor, Indústria de Pneus, S.A. (2021). Manual do Estagiário.
- Coughanowr, D. R., & Koppel, L. B. (1965). Análise e controle do Processo .
- DIP-materiais. (18 de dezembro de 2018). Noções Básicas. Materiais que constituem os pneus. Vila Nova Famalição, Lousado.
- Erman, B., Mark, J., & Roland, C. (2013). The Science and Technology of Rubber. Chapter 1- Rubber Elasticity: Basis Concepts and Behavior. Fourth edition- Elsevier.
- Erman, B., Mark, J., & Roland, C. (2013). The Science and Technology of Rubber. Chapter 9- The science of Rubber Compounding. Elsevier-Fourth.
- Evonik. (2021). Evonik Leading Beyond Chemistry. Obtido em dezembro de 2021, de Evonil Silicas: <https://corporate.evonik.com/en/evonik-acquires-silica-business-154.html>
- Feierabend , R. (abril de 2003). Basis of Mixing .
- Freitas, M. M. (2021). Apontamentos de Controlo de Processos e Automação- Sintonização de Controladores. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

- Gomes , M. M. (2008). Portal da Indústria de Borracha. Obtido em dezembro de 2021, de Rubberpedia: <http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao.php>
- Gomes, S. (junho de 2011). Reduction of variations in compound performance – optimization of temperature control during silica compound mixing. Continental AG, Portugal.
- Jesus, J. M. (Dezembro de 2001). Modelação e controlo de um sistema de climatização.
- Kwong, W. (2013). Introdução ao controle de processos e à Instrumentação usando Scicos.
- Lourenço, J. (1996). Sintonia de controladores . Escola Superior de Tecnologia .
- MAR. (2001). Controladores e Ações Básicas de Controlo.
- Marlin, T. (2015). Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance.
- Momentive. (2013). Silanes- Tires and Rubber. Obtido de Momentive inventing possibilities.
- Moribe, T. (dezembro de 2012). Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. Advanced Intermeshing Mixers for Energy Saving and Reduction of Environmental Impact. Vol.49.
- Moura, M. I. (2021). Otimização da adesividade de materiais no processo produtivo de pneus . Porto.
- Paiva, L. S. (2010). Aplicação de Algoritmos genéricos para a sintonia de controladores. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Pereira, A. (fevereiro de 2021). Missing Process Training.
- Pinheiro, G. S. (2015). Impacto de alterações em compostos de borracha nas suas propriedades reológicas. Porto.
- Pires, N. F. (2012). Sintonia de Controladores baseada em sistemas de inferência difusa. Instituto Superior de Engenharia do Porto .
- Rodrigues, A. R. (2016). Caraterização Reológica de materiais por Rubber Process Analyzer. Porto.
- Seborg, D. E., Edgar, T., Mellichamp, D., & Doyle, F. (2016). Process Dynamics and Control. Wiley.
- Siemens. (2022). Obtido em 2022 de fevereiro , de https://new.siemens.com/global/en/products/automation/process-control.html?gclid=EAIaIQobChMIqtXBMmi9gIVDgGLCh0PBwTHEAAYASAAEgJpM_D_BwE

- Silva, M. V. (2021). Desenvolvimento e implementação de um controlador de temperatura para um forno de aquecimento de materiais compósitos.
- Silva, R. N. (2022). Controlo de Sistemas Dinâmicos .
- Sottomayor, M. (2019). Aumento da Eficiência Energética na área da Mistura . Porto.
- Sousa, R. P. (2011). Melhoria do processo de extrusão na indústria dos pneus. Universidade do Minho.
- Temel, S., Yagli, S., & Goren, S. (2013). EE402-discrete time control systems recitation 4 report.
- Uniroyal. (2021). Componentes de um pneu . Obtido em novembro de 2021, de Uniroyal : <https://www.uniroyal.pt/ligeiros/guia-de-pneus/guia-de-pneus/componentes-de-um-pneu>
- Vieira, J. (2020). Condução no inverno: antecipar o imprevisto . Revistas de Pneus.
- Vieira, J. (2020). Continental Mabor comemora o 30º aniversário . Revista de Pneus.
- Vinhas, H. S. (2016). Otimização Energética de Equipamentos Produtivos. Porto.

ANEXOS

Anexo A- Testes Práticos com Utilização dos Perfis Disponíveis

De modo a caraterizar melhor a situação atual dos controladores, foi necessário, inicialmente, testar todos perfis criados de raiz pela empresa, para compreender qual o comportamento de cada um dos perfis. No presente Anexo A, encontram-se as tabelas com os valores de temperatura e velocidade dos rotores obtidos nos testes experimentais com os perfis já disponíveis no sistema do MMS.

Após a realização dos testes práticos, é possível a extração, na ferramenta do MMS, de todos os dados relativos às cargas realizadas e, consequentemente, reuniu-se todas estas informações nas respetivas Tabelas, que se encontram nos anexos da presente dissertação.

Assim, na Tabela A.1 estão presentes os valores de temperatura e velocidade dos rotores que permitiram a construção das curvas de temperatura e da variação da velocidade dos rotores, apresentadas na secção 4.3 do corpo do relatório, para o perfil 1 com a respetiva combinação de valores: $K_p=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s.

Tabela A.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada, com perfil 1 ($K_p=6$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 30 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
0	158	159	159	159	157	45	45	45	45	45
1	158	159	160	160	158	45	45	45	45	45
2	160	161	160	161	159	45	45	45	45	45
3	161	162	162	161	160	45	45	45	45	45
4	162	163	163	163	162	45	45	45	45	45
5	163	164	164	164	163	45	45	45	45	45
6	164	165	163	165	163	45	45	45	45	45
7	165	166	164	166	163	45	45	45	45	45
8	167	166	165	168	165	45	45	45	44	45
9	167	167	166	169	165	44	45	45	44	45
10	167	168	166	170	165	45	44	45	44	45
11	169	169	168	170	166	44	44	44	43	45
12	170	170	169	172	167	44	43	45	43	44
13	171	170	170	173	167	43	43	44	42	45
14	172	171	170	174	167	42	43	44	41	44
15	173	172	170	174	167	42	42	43	40	44
16	174	172	171	174	168	41	41	43	40	44
17	173	173	172	174	169	40	40	42	39	44
18	174	174	172	175	170	40	40	41	38	43
19	175	174	173	176	171	39	39	41	37	42
20	175	174	173	175	172	38	38	40	37	42
21	176	175	173	176	173	38	38	39	36	41
22	176	175	175	176	173	37	37	39	35	41
23	177	175	175	176	174	35	37	38	34	40
24	177	175	175	177	174	34	36	37	33	39
25	176	175	176	176	174	34	35	36	32	39
26	177	176	176	177	174	33	34	35	32	38
27	177	176	176	177	174	32	33	35	31	37
28	177	176	176	177	174	31	33	34	30	36
29	177	176	176	177	175	31	32	33	29	36
30	176	176	177	178	175	30	31	32	28	35

Tal como acontece para o primeiro perfil testado, também para o perfil 2 e 3 procedeu-se à construção das Tabelas A.2 e A.3, respetivamente, onde se encontram os valores de temperatura e velocidade dos rotores ao longo de todos os segundos da fase *plateau*.

Tabela A.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada, com perfil 2 ($K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 30 segundos de *plateau*.

t(s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
0	159	159	157	159	160	45	45	45	45	45
1	159	159	158	159	161	45	45	45	45	45
2	160	160	159	160	161	45	45	45	45	45
3	162	162	161	161	161	45	45	45	45	45
4	162	162	162	162	162	45	45	45	45	45
5	161	164	163	163	163	45	45	45	45	45
6	160	166	163	165	164	45	45	45	45	45
7	162	166	162	166	164	45	44	45	45	45
8	163	167	162	167	164	46	44	46	45	46
9	163	168	164	167	165	47	44	46	44	45
10	164	168	165	168	166	47	43	46	44	45
11	164	169	165	168	167	46	43	46	43	44
12	166	169	164	169	167	46	42	46	43	44
13	166	169	165	169	168	46	42	46	41	44
14	167	167	165	170	168	46	41	46	41	43
15	168	169	166	171	168	45	41	46	40	43
16	169	169	166	171	168	45	41	45	39	42
17	170	169	168	170	170	43	39	45	38	42
18	170	170	169	171	170	43	39	44	38	41
19	170	170	169	171	170	42	39	43	37	40
20	171	170	170	171	172	41	37	43	35	40
21	171	170	170	172	173	41	36	42	35	38
22	171	169	172	172	174	39	36	41	34	36
23	172	170	172	172	176	39	36	40	33	35
24	173	171	172	172	176	38	35	39	32	33
25	173	171	172	173	176	36	34	38	31	32
26	173	172	173	173	177	35	33	37	30	30
27	172	171	173	173	176	34	32	35	29	29
28	172	172	174	174	175	34	31	34	28	28
29	172	171	174	173	175	33	30	33	27	26
30	171	171	174	173	174	32	29	32	26	25

Tabela A.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada, com perfil 3 ($K_p=3$; $\tau_i=2$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 30 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
0	159	158	160	161	158	45	45	45	45	45
1	160	160	161	160	158	45	45	45	45	45
2	160	160	161	160	159	45	45	45	45	45
3	162	162	162	162	160	45	45	45	45	45
4	162	163	162	163	162	45	45	45	45	45
5	162	164	164	163	161	45	45	45	45	45
6	163	164	163	163	162	45	45	45	45	45
7	162	164	165	164	163	45	46	45	45	45
8	162	165	165	165	164	45	45	45	45	45
9	164	166	167	165	165	46	45	45	45	45
10	164	167	168	165	164	45	45	45	45	45
11	166	168	169	166	165	45	45	45	45	45
12	166	169	169	168	166	45	44	44	45	45
13	166	170	170	169	167	45	44	44	44	45
14	167	170	170	169	168	45	44	44	45	44
15	168	171	170	170	169	45	44	44	44	45
16	169	172	171	171	170	44	43	43	44	44
17	169	174	171	172	170	45	43	43	43	44
18	169	175	172	172	172	44	43	43	43	44
19	170	175	173	173	172	44	42	42	43	43
20	171	176	173	174	173	43	42	42	42	43
21	173	177	174	174	174	44	41	41	42	42
22	174	176	174	174	174	42	40	41	41	42
23	174	177	174	174	175	42	40	41	41	42
24	175	177	174	175	174	42	39	40	41	41
25	176	176	175	175	174	41	39	40	40	41
26	177	176	175	176	174	41	38	40	40	40
27	176	177	175	176	174	40	38	39	39	40
28	176	177	175	176	176	40	37	38	38	40
29	176	178	174	177	176	40	37	38	38	39
30	177	178	175	177	176	39	36	38	38	38

Recorrendo à Figura 4.3 do subcapítulo 4.3, torna-se possível obter os valores de alguns parâmetros que permitem a caracterização das respostas do sistema e, portanto, na Tabela A.4 encontram-se reunidos os principais valores que tornam possível a caracterização das várias respostas para os três perfis.

Tabela A.4. Registo dos valores de dois parâmetros de caracterização de resposta: tempo de subida e overshoot, para cada perfil testado.

Perfil	Cargas	Tempo subida (s)	Overshoot
1	1	7	0,073
	2	6	0,067
	3	8	0,073
	4	6	0,079
	5	8	0,061
3	1	11	0,073
	2	8	0,079
	3	7	0,061
	4	8	0,073
	5	11	0,067
2	1	12	0,048
	2	6	0,042
	3	10	0,055
	4	6	0,055
	5	9	0,073

Anexo B- Testes Práticos com Alteração do Ganho Proporcional

No presente Anexo B, encontram-se os valores experimentais obtidos para os testes realizados com o objetivo de apenas se alterar o parâmetro de controlo proporcional.

Pelo facto de terem sido alterados alguns passos na receita do composto B, realizou-se novamente um teste prático com o perfil 2, de modo a ser possível compará-lo com os novos perfis criados. Tal como mencionado anteriormente, após a realização dos testes práticos, torna-se possível extrair os valores de temperatura e velocidade dos rotores ao longo de todos os segundos da fase *plateau*, permitindo a construção da Tabela B.1.

Tabela B.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 2 ($K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de *plateau*.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
0	161	157	159	158	155	45	45	45	45	45
1	161	158	160	159	157	45	45	45	45	45
2	161	159	160	160	158	45	45	45	45	45
3	161	160	160	162	159	45	45	45	45	45
4	162	162	162	162	161	45	45	45	45	45
5	164	163	162	164	162	45	45	45	45	45
6	164	162	162	165	163	45	45	45	45	45
7	164	164	165	166	164	45	45	45	45	45
8	166	165	165	166	164	45	45	45	45	45
9	167	166	165	168	166	45	45	45	44	45
10	167	167	165	169	167	44	45	45	44	44
11	167	167	163	169	168	44	44	45	43	44
12	168	169	164	169	170	44	44	45	42	43
13	169	170	166	169	171	42	42	45	41	42
14	170	171	166	170	171	42	42	45	40	41
15	170	171	167	171	170	41	40	45	40	40
16	171	171	168	172	171	40	40	44	39	40
17	172	171	169	173	171	40	39	43	37	39
18	172	172	170	172	171	38	38	43	36	38
19	173	172	170	173	172	37	37	42	36	37
20	173	172	171	172	172	36	36	41	35	37
21	174	173	171	172	172	35	35	40	34	35
22	174	173	169	172	172	34	34	40	33	34
23	174	172	170	172	171	32	33	40	31	33
24	174	173	171	172	172	31	32	38	30	33
25	174	173	171	172	172	30	30	37	29	32
26	174	173	172	173	172	29	29	36	28	31
27	174	173	172	172	172	27	28	36	27	30
28	175	173	172	173	173	26	27	34	27	29
29	174	172	172	173	172	25	26	33	26	27
30	174	173	171	173	173	24	26	32	25	26
31	174	173	172	172	172	22	25	31	24	25
32	174	172	171	168	173	21	24	31	23	25
33	174	173	172	169	172	20	22	30	24	24
34	172	172	171	171	173	19	21	29	23	23
35	172	172	172	171	173	18	21	28	22	21
36	172	172	171	172	172	18	20	27	21	20
37	172	170	172	172	172	16	19	27	20	20
38	172	170	170	171	171	16	19	25	19	19
39	172	170	169	169	169	15	18	26	18	19
40	172	170	169	169	169	14	18	25	18	19
41	171	169	168	169	169	13	17	25	18	18
42	171	169	168	168	169	12	17	24	17	18
43	171	169	168	168	168	12	16	24	17	17
44	170	168	168	167	168	11	16	24	17	17
45	170	167	167	167	168	10	16	23	17	17

Tabela B.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 2 ($K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
46	169	168	167	167	167	10	15	24	16	16
47	169	168	167	167	167	9	15	23	16	16
48	168	167	167	167	167	9	14	23	16	16
49	167	168	167	168	167	9	15	23	15	16
50	167	168	169	169	167	9	14	22	15	15
51	167	168	169	169	168	9	14	21	14	15
52	167	168	170	168	168	9	13	21	14	14
53	167	167	171	169	168	8	13	20	13	14
54	167	165	170	170	168	8	13	19	12	14
55	166	165	171	169	169	8	13	18	12	14
56	166	165	169	168	169	8	13	18	11	13
57	166	165	168	169	168	8	13	17	11	12
58	166	165	170	169	167	8	13	17	11	12
59	165	165	169	168	167	8	13	16	10	12
60	165	165	168	165	168	8	13	16	11	12

Consoante os resultados obtidos acima, o perfil seguinte, perfil 4, foi criado com o intuito testar a influência do ganho proporcional e, por isso, decidiu-se aumentar este parâmetro, de modo a que o sistema reaga de forma mais rápida e, consequentemente, as respostas obtidas tenham um tempo de subida inferior. Assim, o perfil 4 tem associado um ganho proporcional igual a 16, mantendo o tempo integral igual a 2,5 s e o tempo derivativo igual a zero. Na Tabela B.2 encontram-se os valores de temperatura e velocidade dos rotores, durante todos os segundos da fase *plateau*, para a série de cargas realizadas com o perfil 4.

Tabela B3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 4 ($K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
0	156	159	159	156	158	45	45	45	45	45
1	157	160	158	157	160	45	45	45	45	45
2	159	160	159	158	160	45	45	45	45	45
3	160	161	160	159	161	45	45	45	45	45
4	161	161	163	162	162	45	45	45	45	45
5	162	163	164	162	163	45	45	45	45	45
6	161	163	166	160	163	45	45	45	45	45
7	162	164	166	160	163	45	45	45	45	46
8	163	164	167	160	164	45	45	44	48	46
9	165	166	167	162	164	45	45	43	48	46
10	165	167	168	162	166	46	44	43	49	46
11	165	167	169	163	167	45	44	42	49	46
12	166	166	169	165	168	45	43	41	48	44
13	167	166	170	166	169	44	44	40	48	43
14	168	165	171	167	170	44	44	38	48	42
15	168	165	171	167	170	42	44	37	47	41
16	169	166	172	168	171	42	43	36	46	40
17	170	168	172	169	172	41	43	35	45	38
18	170	168	172	170	172	39	42	33	44	36
19	170	169	172	170	172	39	41	32	43	35
20	170	170	172	171	172	38	40	30	41	34
21	170	171	173	172	172	36	38	29	40	32
22	171	171	172	172	173	35	37	27	38	31
23	171	172	172	173	172	34	36	26	36	29
24	172	172	172	173	172	33	35	25	35	29
25	172	172	172	173	172	31	33	24	34	27
26	172	173	172	174	172	30	31	22	32	26
27	172	173	172	174	172	28	30	21	30	24

Tabela B.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 4 ($K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
28	173	173	172	174	171	27	28	20	28	23
29	172	173	171	174	172	25	27	18	27	22
30	172	173	170	174	172	24	26	18	25	21
31	172	173	170	173	171	22	24	17	22	19
32	172	172	170	174	172	22	22	16	22	18
33	172	172	170	174	172	20	21	15	20	17
34	171	172	169	174	171	19	20	14	18	15
35	171	171	169	174	172	18	18	14	17	15
36	171	172	169	173	172	17	17	13	15	13
37	170	171	168	172	171	16	17	12	13	12
38	170	168	167	171	170	15	16	12	13	11
39	170	167	166	171	170	15	16	12	12	10
40	168	167	166	172	170	14	16	12	10	9
41	166	166	165	171	169	14	16	12	9	9
42	166	166	165	170	168	14	16	12	8	8
43	165	165	164	169	168	15	16	13	8	8
44	164	165	164	169	167	15	16	13	7	8
45	164	164	164	169	167	15	16	13	6	7
46	164	164	164	169	167	15	17	13	5	7
47	164	165	164	169	166	16	16	14	5	7
48	164	166	164	169	166	16	16	14	5	7
49	165	166	164	169	168	16	15	14	5	6
50	165	167	164	168	168	15	16	14	5	5
51	166	168	165	168	168	15	15	15	5	5
52	167	169	165	167	168	15	14	14	5	5
53	167	168	165	167	168	14	13	14	5	5
54	166	168	166	167	167	14	13	14	5	5
55	167	167	166	167	167	14	13	14	5	5
56	167	166	166	167	167	13	13	14	5	5
57	166	166	165	167	166	13	13	13	5	5
58	165	165	166	167	167	13	13	13	5	5
59	166	164	166	166	166	13	13	13	5	5
60	163	164	165	166	164	14	14	13	5	5

Uma vez obtidos resultados satisfatórios com o perfil 4, criou-se um novo perfil, o perfil 5, cujo ganho proporcional é superior às anteriores e igual a 21, mantendo constantes os tempos integral e derivativo, 2,5 s e 0 s, respetivamente. Assim, procedeu-se à construção da Tabela B.3, relativa aos valores de temperatura e velocidade dos rotores obtidos.

Tabela B.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 5, ($K_p=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
0	158	158	158	160	160	45	45	45	45	45
1	159	159	158	161	160	45	45	45	45	45
2	160	160	160	161	159	45	45	45	45	45
3	159	161	161	162	160	45	45	45	45	45
4	162	162	162	162	161	45	45	45	45	45
5	163	163	161	163	163	45	45	45	45	45
6	164	163	161	165	162	45	45	45	45	45
7	165	165	162	166	164	45	45	45	45	45
8	166	166	163	166	166	44	45	47	44	45
9	166	167	164	166	167	44	44	48	44	44
10	166	168	166	167	167	44	42	46	43	43
11	167	169	167	168	168	43	42	45	42	42
12	168	170	168	169	169	43	40	44	41	41
13	168	170	170	170	169	41	38	43	40	40
14	169	170	171	172	169	40	37	40	37	39

Tabela B.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 5, ($K_p=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	T _{C5} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)	V _{C5} (rpm)
15	170	170	172	172	169	39	36	38	34	38
16	170	170	172	172	169	36	34	36	32	36
17	169	171	173	172	170	35	32	34	30	36
18	170	171	173	172	170	35	30	32	28	34
19	171	172	173	172	169	33	29	29	27	33
20	171	172	173	172	169	31	27	28	25	33
21	171	172	173	173	169	30	25	26	24	31
22	172	172	173	173	169	28	24	24	22	30
23	172	172	173	172	170	26	23	22	19	28
24	171	171	172	172	170	25	21	20	18	28
25	170	170	172	171	170	23	19	19	17	26
26	170	170	172	170	170	22	19	17	15	25
27	170	170	171	170	170	21	17	15	15	24
28	170	169	171	168	169	20	17	14	13	22
29	170	168	171	168	170	18	16	13	14	21
30	168	163	170	168	168	17	16	11	13	21
31	167	162	170	167	168	17	19	10	13	20
32	168	162	169	164	168	17	20	9	13	19
33	166	162	169	164	168	16	21	9	14	19
34	165	162	169	164	168	17	22	8	15	18
35	165	162	169	164	168	17	22	7	15	17
36	166	163	168	164	168	17	23	6	16	17
37	165	164	167	164	168	17	23	6	15	16
38	165	164	165	164	168	17	23	6	16	15
39	165	164	164	163	167	17	23	7	16	15
40	165	164	164	162	167	17	23	7	18	15
41	165	164	164	162	167	16	23	8	19	14
42	165	164	164	162	167	16	23	8	19	14
43	165	164	163	162	167	16	24	9	20	13
44	164	163	162	161	166	17	24	10	21	13
45	164	163	161	161	166	17	25	11	22	12
46	164	163	160	161	165	17	26	13	23	13
47	164	163	160	162	165	18	26	14	24	13
48	165	163	161	162	165	18	27	16	24	13
49	165	165	163	164	165	17	27	16	25	13
50	166	165	165	164	165	17	26	15	24	13
51	167	167	164	166	165	16	25	14	24	13
52	166	167	166	167	165	15	24	15	23	14
53	167	168	166	167	165	16	24	14	22	13
54	167	168	166	167	166	15	23	14	21	13
55	166	167	165	167	165	14	22	14	21	13
56	166	168	166	168	166	14	21	14	21	13
57	166	168	166	168	164	14	20	13	19	12
58	167	167	165	167	164	13	20	14	19	13
59	165	168	164	167	164	13	19	14	19	13
60	164	168	164	168	165	14	18	15	18	13

Após a realização dos testes com o perfil 5 e, visto que, é notório uma reação mais rápida do sistema com o perfil referido acima, decidiu-se aumentar o ganho proporcional para o valor de 26, com os tempos integral e derivativo constantes, 2,5 s e 0 s, respetivamente. Tal como aconteceu anteriormente, procedeu-se à extração de dados e construção da Tabela B.4.

Tabela B.7. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 6 ($K_p=26$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	153	157	159	160	45	45	45	45
1	155	158	160	160	45	45	45	45
2	157	160	161	161	45	45	45	45
3	160	161	162	160	45	45	45	45
4	163	164	163	162	45	45	45	45
5	164	168	165	164	45	45	45	45
6	164	169	166	164	45	45	44	45
7	165	171	166	164	45	39	44	45
8	165	172	166	166	45	35	43	44
9	165	173	167	167	45	33	42	43
10	165	172	169	168	45	31	40	41
11	164	172	170	169	45	28	37	39
12	164	173	170	170	46	26	35	38
13	165	172	171	171	46	23	33	35
14	164	172	170	172	46	21	32	33
15	165	173	170	172	45	19	30	30
16	166	171	171	172	44	17	28	27
17	167	170	171	173	43	17	26	25
18	169	171	171	173	41	15	24	22
19	168	169	172	171	40	15	22	21
20	170	167	171	170	37	15	21	21
21	171	167	171	169	35	14	18	20
22	171	168	171	169	33	13	17	19
23	172	167	170	168	31	14	16	19
24	172	166	171	167	29	13	13	20
25	172	166	170	163	26	13	13	22
26	171	167	168	162	24	12	13	23
27	172	166	167	162	22	12	13	24
28	171	165	166	163	21	13	13	25
29	171	164	165	163	19	14	14	26
30	171	164	164	163	17	14	15	27
31	170	164	164	163	16	14	14	27
32	171	163	164	163	13	16	15	27
33	171	162	164	164	12	17	15	27
34	170	162	164	164	11	17	16	27
35	169	164	164	164	11	18	15	27
36	169	163	165	165	10	19	15	27
37	168	162	165	165	10	20	15	27
38	165	162	165	166	12	21	15	26
39	164	162	165	166	12	22	16	26
40	164	162	165	166	13	23	15	26
41	163	162	165	166	14	24	16	26
42	163	162	164	166	15	25	16	25
43	163	162	164	166	16	26	17	25
44	161	162	163	165	18	26	18	25
45	161	162	163	165	19	27	18	26
46	161	162	163	165	20	28	19	26
47	161	162	163	166	21	29	19	24
48	162	162	163	166	22	30	20	23
49	162	162	164	167	23	31	19	22
50	162	163	164	168	24	30	20	21
51	162	163	165	168	23	31	19	19

Tabela B.8. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 6 ($K_p=26$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
52	164	165	164	169	24	31	20	18
53	163	164	164	168	25	31	20	18
54	163	165	165	168	25	30	20	17
55	163	165	164	168	26	30	20	17
56	164	165	165	166	25	30	20	17
57	165	165	165	166	25	29	20	17
58	164	168	165	166	25	27	20	16
59	166	167	165	166	24	27	20	16
60	167	168	166	166	23	25	19	15

Anexo C- Testes Práticos com Alteração do Tempo Integral

No presente Anexo, encontram-se os resultados experimentais obtidos na serie de testes onde se utilizou diferentes valores de τ_i para o mesmo valor de ganho proporcional, $K_p=21$.

Neste segundo conjunto de testes, o primeiro perfil criado foi o perfil 7, cujo ganho proporcional se fixou em 21 e decidiu-se testar o tempo integral com um valor igual a 3,5 s. Na Tabela C.1 que diz respeito às quatro cargas realizadas com perfil 7 associado.

Tabela C.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 7 ($K_p=21$; $\tau_i=3,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	161	158	158	159	45	45	45	45
1	161	160	160	159	45	45	45	45
2	161	160	160	160	45	45	45	45
3	161	161	161	161	45	45	45	45
4	162	162	162	162	45	45	45	45
5	162	163	163	162	45	45	45	45
6	162	164	164	162	45	45	45	45
7	163	163	163	163	46	45	45	45
8	163	164	164	165	46	47	45	47
9	164	165	165	166	47	46	43	45
10	164	166	166	168	47	45	43	44
11	164	167	167	169	47	44	43	43
12	166	168	168	170	46	44	42	42
13	167	169	169	171	46	42	42	40
14	167	169	169	170	45	41	41	39
15	168	170	170	170	44	40	40	38
16	170	170	170	169	43	39	39	38
17	171	171	171	170	41	38	38	36
18	171	172	172	170	40	36	37	36
19	171	173	173	170	38	35	35	35
20	171	172	172	171	38	33	34	34
21	172	172	172	172	36	31	32	32
22	173	172	172	172	34	30	30	31
23	174	172	172	172	32	29	30	29
24	174	172	172	172	30	28	28	28
25	175	172	172	172	28	27	27	26
26	174	172	172	172	27	26	26	25
27	175	172	172	172	26	25	23	23
28	174	172	172	172	24	23	22	22
29	173	172	172	172	23	21	21	21
30	174	172	172	172	21	21	19	20
31	173	172	172	172	20	20	17	18
32	173	170	170	170	19	18	16	18
33	173	171	171	170	17	18	15	17
34	172	171	171	171	16	17	15	17
35	171	170	170	171	15	16	13	15
36	172	170	170	170	14	16	13	14
37	172	170	170	170	13	14	13	13
38	170	170	170	170	12	14	13	13
39	169	168	168	169	12	13	14	12
40	168	168	168	168	12	14	13	12
41	168	168	168	168	12	13	13	12
42	167	168	168	167	12	13	13	12
43	167	167	167	167	11	12	13	11
44	166	167	167	166	11	12	13	11
45	166	167	167	165	11	12	14	12
46	168	167	167	164	11	12	15	12

Tabela C.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 7 ($K_p=21$; $\tau_i=3,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
47	168	166	166	164	10	11	15	13
48	168	166	166	164	9	11	15	13
49	168	166	166	164	8	11	15	13
50	168	166	166	165	8	11	13	13
51	167	166	166	166	7	11	14	12
52	167	167	167	166	7	10	13	12
53	168	168	168	167	7	10	12	12
54	167	167	167	167	6	9	12	11
55	167	166	166	166	6	9	11	11
56	167	166	166	165	5	9	11	11
57	163	167	167	165	6	9	10	11
58	163	166	166	166	8	8	10	11
59	162	166	166	164	9	8	10	11
60	162	165	165	164	9	9	10	12

Por outro lado, decidiu-se voltar a testar a combinação de valores do perfil 5 do Anexo B. Na Tabela C.2 estão apresentados os valores referente aos valores de temperatura e velocidade dos rotores lidos, através do sistema MMS, para cada carga efetuada com o perfil 5, durante todos os segundos da fase de *plateau*.

Tabela C.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 5 ($K_p=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	159	154	160	158	45	45	45	45
1	159	156	160	159	45	45	45	45
2	159	158	160	159	45	45	45	45
3	160	160	161	160	45	45	45	45
4	162	161	162	161	45	45	45	45
5	163	163	162	164	45	45	45	45
6	163	164	163	167	45	45	45	45
7	164	163	164	168	45	45	45	45
8	163	164	165	168	46	45	45	42
9	163	165	166	167	47	46	45	43
10	164	165	167	168	47	46	44	42
11	165	164	168	169	47	46	43	41
12	166	164	168	169	47	46	42	39
13	166	165	169	170	46	46	41	38
14	166	166	169	170	46	46	39	36
15	168	167	169	171	45	45	38	35
16	169	166	170	172	44	45	37	33
17	169	168	171	172	42	43	35	31
18	169	168	171	169	41	43	34	30
19	169	169	171	170	39	41	32	30
20	170	169	171	170	38	40	30	28
21	170	169	171	170	37	39	29	27
22	171	170	171	170	36	38	28	25
23	172	170	171	169	34	36	26	25
24	172	171	172	169	31	35	24	23
25	172	171	171	170	29	33	22	22
26	172	172	171	171	27	31	20	21
27	173	172	171	171	26	30	20	19
28	172	172	170	170	24	28	18	17
29	172	171	170	170	22	26	17	17
30	172	172	170	170	20	24	17	15
31	172	171	168	168	18	22	15	15
32	171	172	168	168	17	21	16	14
33	169	171	166	168	16	20	15	14

Tabela C.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 5 ($K_p=21$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
34	168	170	166	166	17	18	15	13
35	167	171	165	166	16	17	15	15
36	168	170	164	165	16	15	17	14
37	168	169	165	164	15	15	17	15
38	167	168	164	163	14	15	17	16
39	166	168	164	163	14	14	17	17
40	165	167	164	163	14	14	17	17
41	165	167	164	163	15	13	17	18
42	164	166	164	163	15	13	18	18
43	164	166	164	162	16	13	18	19
44	164	165	164	162	16	13	18	19
45	164	165	164	163	16	13	18	20
46	164	165	164	163	17	14	18	20
47	164	164	164	163	16	14	18	21
48	164	164	164	163	17	14	19	21
49	165	164	164	163	17	14	19	21
50	166	165	164	164	16	14	19	22
51	166	165	164	164	16	14	19	22
52	167	166	164	164	16	14	19	22
53	167	166	164	164	15	13	20	23
54	166	166	165	164	14	13	20	23
55	166	166	165	165	14	13	19	22
56	167	166	165	165	14	13	19	22
57	167	166	166	166	13	12	19	22
58	166	166	166	166	13	12	19	22
59	166	165	166	166	13	12	19	21
60	167	165	166	167	13	12	18	21

Uma vez que, com o perfil 7, o sistema reagiu de forma mais lenta, decidiu-se testar para o perfil 8 um valor mais baixo de tempo integral. Sendo assim, para o perfil 6 fixou-se o ganho proporcional em 21 e o valor do tempo integral em 1,5 s, não apresentado valor do tempo derivativo. Assim sendo, realizou-se o registo das curvas, tendo-se obtido a Tabela C.3 relativamente as quatro cargas com o perfil 8 associado.

Tabela C.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade de rotores de cada carga realizada com perfil 8 ($K_p=21$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	158	158	161	45	45	45	45
1	160	158	158	161	45	46	45	45
2	158	160	160	162	45	45	45	45
3	159	161	161	161	45	45	45	45
4	161	162	162	162	45	45	45	45
5	164	163	163	164	45	45	45	45
6	166	163	163	166	45	45	45	45
7	168	165	165	168	45	45	45	45
8	168	165	165	169	43	45	45	42
9	168	166	166	169	41	45	44	41
10	168	167	167	170	39	45	44	39
11	170	167	167	171	38	44	42	36
12	170	168	168	172	36	41	42	33
13	171	168	168	172	33	40	40	30
14	172	168	168	172	30	37	38	27
15	171	169	169	171	27	33	37	24
16	171	169	169	171	25	30	36	22
17	172	170	170	170	22	27	34	20
18	171	170	170	169	19	24	32	17

Tabela C.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade de rotores de cada carga realizada com perfil 8 ($K_P=21$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
19	171	170	170	170	17	21	29	16
20	170	169	169	169	15	18	27	14
21	169	168	168	168	13	16	27	13
22	169	169	169	167	11	14	25	12
23	169	169	169	167	10	14	23	12
24	168	167	167	166	8	14	22	10
25	166	167	167	166	7	14	22	10
26	166	167	167	166	8	13	21	11
27	161	166	166	166	8	13	20	10
28	160	166	166	165	11	12	20	10
29	160	165	165	165	14	13	21	10
30	160	165	165	165	16	12	21	10
31	160	166	166	164	18	12	20	11
32	161	166	166	163	19	12	20	12
33	161	166	166	163	22	11	19	13
34	161	166	166	162	23	12	19	14
35	162	167	167	162	24	12	18	15
36	162	166	166	162	25	12	17	17
37	162	167	167	162	27	13	17	18
38	163	167	167	162	28	14	16	19
39	164	166	166	162	28	16	15	20
40	164	165	165	162	28	17	15	21
41	164	165	165	162	29	18	15	22
42	164	164	164	162	29	19	16	24
43	164	163	163	162	29	20	17	25
44	164	163	163	162	30	21	18	26
45	163	164	164	162	30	23	18	27
46	163	165	165	162	31	24	18	28
47	163	164	164	162	32	25	18	29
48	163	165	165	163	33	26	18	30
49	165	166	166	163	33	27	18	31
50	166	166	166	164	32	28	17	31
51	166	166	166	164	31	29	17	32
52	167	167	167	165	30	29	16	32
53	165	164	164	165	30	30	16	31
54	166	163	163	166	31	30	18	31
55	166	164	164	166	30	30	18	30
56	168	164	164	168	29	29	18	30
57	167	164	164	167	27	29	18	28
58	167	165	165	168	27	28	19	27
59	167	165	165	168	26	27	18	26
60	168	165	165	169	25	26	19	25

Finalmente, decidiu-se testar um valor de tempo integral igual a 1 s e, por consequência, o perfil 9 apresenta uma combinação de valores cujo o ganho proporcional é igual a 21, o tempo integral igual a 1 s, mantendo constante o tempo derivativo. Na Tabela C.4 estão apresentados os valores de temperatura e velocidade dos rotores lidos na ferramenta do MMS para as cargas realizadas com o respetivo perfil.

Tabela C.7. Registo dos valores de temperatura de cada carga realizada com perfil 9 ($K_p=21$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	161	153	161	155	45	45	45	45
1	161	155	161	155	45	45	45	45
2	161	158	162	156	45	45	45	45
3	162	161	161	159	45	45	45	45
4	162	162	162	161	45	45	45	45
5	162	163	164	163	45	45	45	45
6	164	164	165	164	45	45	45	45
7	168	164	166	164	45	45	45	45
8	169	164	166	164	42	46	44	46
9	170	165	166	164	39	46	43	47
10	170	165	167	166	35	46	42	46
11	169	167	169	168	32	45	40	45
12	169	167	170	169	30	44	37	42
13	169	168	169	170	27	42	34	39
14	169	169	169	172	25	40	32	35
15	169	169	170	173	24	37	29	31
16	168	169	170	172	21	35	26	26
17	167	169	169	173	20	33	23	21
18	167	169	170	169	19	30	20	17
19	165	169	169	167	18	28	17	15
20	165	168	168	167	17	25	14	14
21	165	168	169	167	18	23	13	13
22	165	168	169	166	18	21	10	12
23	165	168	167	165	18	20	8	12
24	165	168	166	163	18	18	8	12
25	165	168	166	163	18	16	7	15
26	166	168	165	162	18	14	7	15
27	165	168	165	161	17	13	7	18
28	166	168	165	161	17	10	7	21
29	165	167	165	163	17	9	7	22
30	165	166	165	164	17	9	7	24
31	165	166	163	165	17	8	7	24
32	165	166	163	165	16	8	9	23
33	165	166	162	166	17	8	11	22
34	165	165	162	166	16	7	12	22
35	166	165	163	167	16	7	14	22
36	166	164	163	167	16	8	14	20
37	164	162	160	168	16	8	17	19
38	164	161	159	168	17	11	21	16
39	164	161	159	166	17	14	25	15
40	163	161	158	166	18	17	29	15
41	163	159	158	165	20	19	33	15
42	162	158	158	165	21	23	37	16
43	162	158	160	165	23	27	41	16
44	161	161	160	165	25	31	44	16
45	162	162	163	166	28	34	46	15
46	163	163	165	166	29	34	46	14
47	164	165	165	166	30	35	46	13
48	164	166	166	166	30	34	46	13
49	166	168	168	166	30	33	44	13
50	166	168	170	167	28	31	42	12
51	168	168	170	166	28	29	39	10
52	166	168	169	166	26	27	36	10
53	166	169	170	166	26	25	33	10
54	166	168	170	166	25	22	30	10
55	167	169	170	166	25	21	27	9
56	167	168	171	166	23	18	24	9
57	166	167	172	165	21	16	20	8
58	168	168	170	165	21	15	16	8
59	167	167	170	164	19	13	13	8
60	166	166	170	164	18	13	10	9

Anexo D- Testes Práticos de Ajuste nos Parâmetros Proporcional e Integral

No presente Anexo D, encontram-se os resultados experimentais obtidos para os testes práticos realizados com diferentes combinações dos parâmetros de controlo proporcional e integral, sendo que, este conjunto de testes teve como finalidade encontrar a melhor combinação testada até ao momento.

Inicialmente, utilizou-se diferentes valores de K_P para o mesmo valor de tempo integral, $\tau_i = 1$ s, sendo que, o principal objetivo foi baixar o valor de ganho proporcional escolhido anteriormente, de modo a tentar diminuir as variações bruscas na velocidade dos rotores.

Para tal, iniciou-se com o perfil 10 cuja combinação de valores é a seguinte, ganho proporcional igual a 16, tempo integral igual a 1 s e tempo derivativo com o valor de zero novamente. Na Tabela D.1, apresentam-se todos os valores de temperatura e dos rotores.

Tabela D.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade do rotores de cada carga realizada com perfil 10 ($K_P=16$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	159	158	160	156	45	45	45	45
1	160	159	160	159	45	45	45	45
2	161	160	161	159	45	45	45	45
3	163	161	162	160	45	45	45	45
4	163	162	164	162	45	45	45	45
5	163	163	166	163	45	45	45	45
6	163	164	168	164	45	45	42	45
7	163	164	170	163	47	46	39	46
8	165	164	171	164	48	46	36	46
9	167	166	173	165	48	46	32	46
10	168	166	173	166	48	45	29	46
11	168	166	173	168	46	45	25	44
12	169	167	171	168	45	44	22	43
13	171	167	171	169	43	43	19	41
14	171	168	171	169	40	42	17	39
15	171	170	170	170	38	40	15	37
16	172	170	169	170	35	37	13	34
17	172	171	169	170	31	34	11	32
18	173	169	168	170	27	32	10	29
19	173	170	167	170	24	30	10	27
20	172	169	166	169	20	28	9	25
21	172	170	166	169	17	25	9	23
22	170	170	166	169	14	23	9	20
23	170	170	158	168	10	21	12	19
24	169	170	158	168	8	18	17	18
25	169	169	157	168	6	15	21	16
26	168	169	157	168	5	14	25	15
27	168	163	158	166	5	13	29	13
28	168	163	158	163	5	16	32	15
29	167	163	159	162	5	16	35	16
30	166	163	160	162	5	18	36	17
31	166	162	161	161	5	18	38	19
32	165	162	162	160	5	20	40	22
33	165	163	162	159	5	21	40	24
34	164	163	163	159	5	22	41	27
35	164	163	164	160	6	23	41	29
36	163	163	166	161	6	25	40	32

Tabela D.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade do rotores de cada carga realizada com perfil 10 ($K_p=16$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
37	162	163	166	161	7	25	39	34
38	161	164	167	161	9	26	37	36
39	160	164	167	161	11	27	36	38
40	160	164	168	162	13	27	35	39
41	159	164	168	162	15	28	34	41
42	160	163	168	162	18	28	32	42
43	159	163	168	162	21	29	31	43
44	160	163	168	162	23	30	30	44
45	162	163	168	165	26	31	28	45
46	165	164	168	166	28	31	27	44
47	165	164	168	166	28	32	25	43
48	167	165	168	167	28	32	24	43
49	168	166	169	168	27	32	22	41
50	168	167	169	170	26	30	20	39
51	168	168	169	168	24	29	18	37
52	168	168	170	169	23	27	15	36
53	168	169	170	170	21	26	13	34
54	168	169	170	169	20	24	11	31
55	168	170	170	170	18	22	8	29
56	165	170	170	170	17	19	5	26
57	164	168	170	171	16	17	5	24
58	165	170	170	171	17	16	5	21
59	165	170	170	172	18	13	5	18
60	165	169	169	172	17	11	5	15

Para o perfil 11 manteve-se os mesmos valores de tempos integral e derivativo e apenas se fez variar o ganho proporcional para o valor igual a 17. A Tabela D.2 é, então, referente aos valores de temperatura no interior da câmara de mistura e velocidade de rotores ao longo dos passos 9 e 10, para as cinco cargas realizadas com o perfil 11.

Tabela D.3. Registo dos valores de temperatura de cada carga realizada com perfil 11 ($K_p=17$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	157	158	158	45	45	45	45
1	160	159	159	160	45	45	45	45
2	161	160	161	160	45	45	45	45
3	162	162	162	162	45	45	45	45
4	163	162	163	163	45	45	45	45
5	163	164	162	164	45	45	45	45
6	164	166	162	165	45	45	45	45
7	165	166	162	167	45	44	49	44
8	165	165	163	168	46	44	50	43
9	165	164	165	168	46	44	50	41
10	166	164	167	170	45	45	49	39
11	165	165	168	170	44	45	47	36
12	166	166	170	171	44	45	46	34
13	166	168	171	171	44	43	43	30
14	166	169	172	170	43	41	40	27
15	167	168	173	171	43	40	36	24
16	168	170	173	169	41	38	32	22
17	169	171	172	169	39	35	27	20
18	171	172	171	168	37	31	24	18
19	171	172	171	168	34	27	21	17
20	172	171	170	167	30	24	18	16

Tabela D.4. Registo dos valores de temperatura de cada carga realizada com perfil 11 ($K_P=17$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
21	172	172	170	167	27	21	16	15
22	170	171	170	166	24	17	13	14
23	170	170	169	166	21	15	10	14
24	170	170	166	165	19	13	8	14
25	170	170	166	165	16	10	8	14
26	169	168	166	162	14	8	8	14
27	169	167	166	162	12	7	8	17
28	169	166	165	161	10	6	7	19
29	168	166	165	161	8	6	7	21
30	164	163	163	161	7	6	8	23
31	159	160	160	161	9	8	10	25
32	158	159	160	162	13	11	13	27
33	158	158	160	162	17	14	16	28
34	158	158	160	164	20	18	17	29
35	159	158	160	165	24	21	21	29
36	159	158	160	166	27	25	23	29
37	160	159	161	165	30	29	25	29
38	160	159	161	163	32	32	27	29
39	160	159	161	163	35	35	29	31
40	160	160	161	163	37	37	31	32
41	160	160	162	163	40	40	33	33
42	160	161	162	163	42	42	34	34
43	161	162	162	163	44	43	36	35
44	161	162	162	165	46	45	38	35
45	162	162	162	166	48	46	39	34
46	165	163	162	168	49	48	41	33
47	167	163	162	168	49	48	43	32
48	168	164	164	168	46	49	43	30
49	169	164	167	169	45	49	43	28
50	169	167	168	168	42	49	41	26
51	169	167	170	169	40	47	39	25
52	170	168	171	166	38	45	36	23
53	171	170	170	164	35	44	33	24
54	171	170	170	165	32	40	31	24
55	169	172	171	165	29	38	28	24
56	169	172	171	166	27	34	24	24
57	170	172	171	166	25	31	21	23
58	170	173	171	167	23	27	18	22
59	170	173	170	167	20	23	15	21
60	171	173	170	168	17	18	12	20

Para o perfil 12 optou-se por manter os mesmos valores de tempos integral e derivativo e, decidiu-se aumentar o ganho proporcional para o valor de 18. Na Tabela D.3 encontram-se representados os valores de temperatura de carga e velocidade de rotores durante a fase *plateau*, extraídos das curvas obtidas pela ferramenta MMS.

Tabela D.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 12 ($K_p=18$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	158	159	158	45	45	45	45
1	160	160	159	160	45	45	45	45
2	161	160	161	162	45	45	45	45
3	162	161	162	162	45	45	45	45
4	163	163	163	163	45	45	45	45
5	164	162	164	164	45	45	45	45
6	166	163	165	165	45	46	45	45
7	167	164	167	165	45	47	45	45
8	168	164	168	165	43	47	43	45
9	167	165	169	166	41	47	41	45
10	167	166	169	166	40	45	39	44
11	167	168	169	167	39	43	36	44
12	167	169	167	166	38	41	34	43
13	169	170	168	167	37	38	34	42
14	169	170	167	166	34	35	32	41
15	169	171	166	166	32	32	31	41
16	170	171	166	165	30	29	32	40
17	169	170	167	168	27	26	31	40
18	169	170	167	170	25	23	30	38
19	170	169	168	171	23	21	29	35
20	169	168	168	172	20	20	27	32
21	170	168	168	171	18	19	25	28
22	168	165	168	172	16	19	23	24
23	168	164	168	171	14	21	22	20
24	168	164	168	171	13	21	20	18
25	168	164	168	171	11	22	18	14
26	168	164	168	170	10	23	16	11
27	168	164	167	169	8	23	15	8
28	168	164	166	168	7	24	14	6
29	168	164	167	168	5	24	14	5
30	168	164	167	168	5	24	13	5
31	167	165	167	167	5	25	11	5
32	167	165	167	165	5	25	10	5
33	166	165	166	165	5	25	10	5
34	166	165	164	165	5	24	10	5
35	165	166	163	165	5	24	12	6
36	164	166	162	163	6	23	13	6
37	161	166	162	160	7	23	15	8
38	160	166	161	159	10	23	17	12
39	160	166	161	159	12	23	19	15
40	160	165	160	159	15	22	21	18
41	160	165	160	159	18	22	24	21
42	160	165	160	159	21	22	27	25
43	160	164	160	159	23	23	29	28
44	160	164	160	159	26	23	32	31
45	160	164	161	160	29	24	34	34
46	161	164	161	160	31	24	36	37
47	161	165	161	160	33	24	38	40
48	161	165	162	162	36	24	40	42
49	161	165	164	164	38	24	42	43
50	162	166	165	166	39	23	42	43
51	162	166	167	167	41	22	41	41
52	163	166	168	168	42	21	39	41
53	164	166	168	168	43	21	37	38
54	164	166	169	169	43	21	35	37
55	165	166	169	169	43	19	34	34
56	166	166	168	171	43	19	31	32
57	167	166	169	171	42	18	30	29
58	169	166	169	171	41	17	28	25
59	170	167	169	171	38	16	26	22
60	171	167	170	172	35	15	23	18

Os próximos testes foram realizados com o perfil 13, onde o ganho proporcional apresenta um valor de 19 e os outros dois parâmetros do controlador são mantidos constantes. A Tabela D.4 é relativa aos valores extraídos da fase *plateau*.

Tabela D.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 13 ($K_P=19$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de *plateau*.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	154	158	159	159	45	45	45	45
1	157	159	159	159	45	45	45	45
2	158	160	160	161	45	45	45	45
3	161	161	162	162	45	45	45	45
4	163	162	163	163	45	45	45	45
5	163	163	163	163	45	45	45	45
6	163	164	163	164	47	45	46	45
7	163	165	162	165	47	45	46	46
8	164	167	164	166	48	45	48	46
9	165	167	166	167	48	43	48	45
10	165	169	169	168	47	41	47	44
11	167	170	171	169	46	39	44	42
12	168	171	172	170	44	35	40	41
13	169	172	172	170	41	31	35	38
14	170	172	172	171	38	27	31	35
15	170	172	172	173	35	23	27	32
16	169	171	172	172	33	19	23	28
17	170	170	172	171	31	15	19	23
18	166	170	168	171	31	13	16	19
19	167	170	167	170	30	9	16	16
20	166	168	166	167	29	8	15	12
21	167	167	166	166	27	6	15	10
22	167	166	165	162	26	6	14	10
23	168	166	164	159	24	5	14	10
24	167	165	162	158	24	5	15	13
25	167	162	160	158	22	6	18	17
26	168	161	159	157	21	8	21	21
27	167	161	158	157	20	11	24	25
28	168	160	159	157	18	13	29	30
29	168	160	159	158	17	16	32	34
30	167	160	160	159	16	18	35	39
31	167	160	160	161	14	21	39	44
32	167	160	162	164	13	25	41	46
33	167	160	164	167	12	28	41	47
34	166	160	166	168	12	31	41	46
35	166	162	168	170	11	34	40	45
36	166	163	168	170	11	35	37	42
37	165	162	167	170	12	36	35	40
38	164	162	167	169	13	37	34	36
39	163	163	167	168	14	39	33	33
40	162	163	168	167	16	40	32	31
41	162	162	168	167	18	41	30	30
42	161	163	168	167	21	43	29	29
43	161	163	168	167	23	43	27	28
44	160	164	168	167	26	44	26	26
45	160	165	168	168	29	44	25	25
46	160	168	168	168	31	43	23	24
47	161	169	169	168	34	41	21	22
48	161	170	169	169	35	38	18	21
49	164	170	170	170	34	35	16	19
50	166	170	170	169	34	32	13	17
51	165	171	168	169	34	30	11	14
52	166	170	168	169	33	26	9	12

Tabela D.7. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 13 ($K_P=19$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
53	167	171	168	168	31	22	7	10
54	167	170	168	168	30	19	5	8
55	168	171	168	168	28	16	5	6
56	168	170	168	168	26	13	5	5
57	169	169	168	168	24	10	5	5
58	168	168	168	167	22	8	5	5
59	168	167	168	166	21	6	5	5
60	168	166	168	166	19	5	5	5

Por fim, definiu-se testar o perfil 14 que apresenta um valor de ganho proporcional igual a 20 e o tempo integral e derivativo igual a 1 s e 0 s, respetivamente. A Tabela D.5 refere-se aos valores de temperatura e de velocidade dos rotores das cargas realizadas.

Tabela D.8. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 14 ($K_P=20$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	158	160	160	162	45	45	45	45
1	160	161	160	161	45	45	45	45
2	160	161	161	160	45	45	45	45
3	162	162	161	162	45	45	45	45
4	163	163	162	163	45	45	45	45
5	165	166	164	162	45	45	45	45
6	166	168	164	162	45	45	46	46
7	168	168	164	161	44	42	46	48
8	169	168	165	163	41	41	45	50
9	168	168	166	166	38	38	44	50
10	166	168	167	167	37	36	43	49
11	164	168	166	168	37	34	42	47
12	165	168	165	170	38	33	42	45
13	165	168	167	170	38	32	40	41
14	166	168	168	171	37	30	39	38
15	166	168	168	172	37	28	37	34
16	164	168	169	173	37	26	34	29
17	166	167	169	173	37	24	31	25
18	167	167	171	173	37	23	28	20
19	168	165	171	172	34	23	24	14
20	168	166	170	171	32	23	21	11
21	169	164	170	170	30	23	18	7
22	169	164	170	169	27	23	16	5
23	170	165	169	168	25	24	13	5
24	170	165	168	168	22	24	12	5
25	170	165	168	164	19	24	10	5
26	169	165	168	160	16	23	8	7
27	169	166	167	159	15	23	8	12
28	169	166	166	159	12	23	8	16
29	167	165	160	159	10	23	13	19
30	166	165	159	160	9	22	17	23
31	160	166	159	160	10	22	21	26
32	158	166	159	161	13	22	24	29
33	158	166	160	161	19	21	28	31
34	158	166	160	163	23	20	30	33
35	159	166	161	165	27	19	33	34
36	159	166	162	165	31	19	34	33
37	160	165	162	165	34	18	36	33
38	160	165	163	164	37	18	37	34

Tabela D.9. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 14 ($K_p=20$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
39	161	165	164	164	40	19	37	35
40	162	165	164	164	42	19	38	35
41	162	165	164	165	43	19	38	35
42	162	165	164	165	45	19	38	35
43	162	165	164	165	46	19	39	35
44	162	165	164	165	48	19	40	35
45	163	165	164	165	49	19	41	35
46	165	165	164	166	50	19	41	35
47	166	165	165	167	49	20	40	34
48	168	165	167	167	48	19	38	33
49	170	165	168	169	45	20	36	31
50	171	165	169	169	42	19	34	29
51	171	166	170	169	38	19	30	26
52	171	166	171	168	34	18	26	24
53	172	167	172	168	30	17	22	21
54	172	166	172	168	26	16	18	20
55	172	167	172	168	22	15	14	18
56	172	167	170	169	18	14	11	15
57	171	167	170	169	13	12	9	13
58	172	167	170	169	10	11	6	11
59	171	168	169	169	6	9	5	9
60	170	168	168	169	5	8	5	6

Uma vez que, os resultados obtidos foram tão equivalentes, as curvas de temperatura e velocidade dos rotores não se encontram no corpo de relatório e, portanto, as Figuras D.1 e D.2 representam o comportamento da temperatura das cargas e velocidade dos rotores respetivamente, e são as curvas relativas aos perfis mencionados acima.

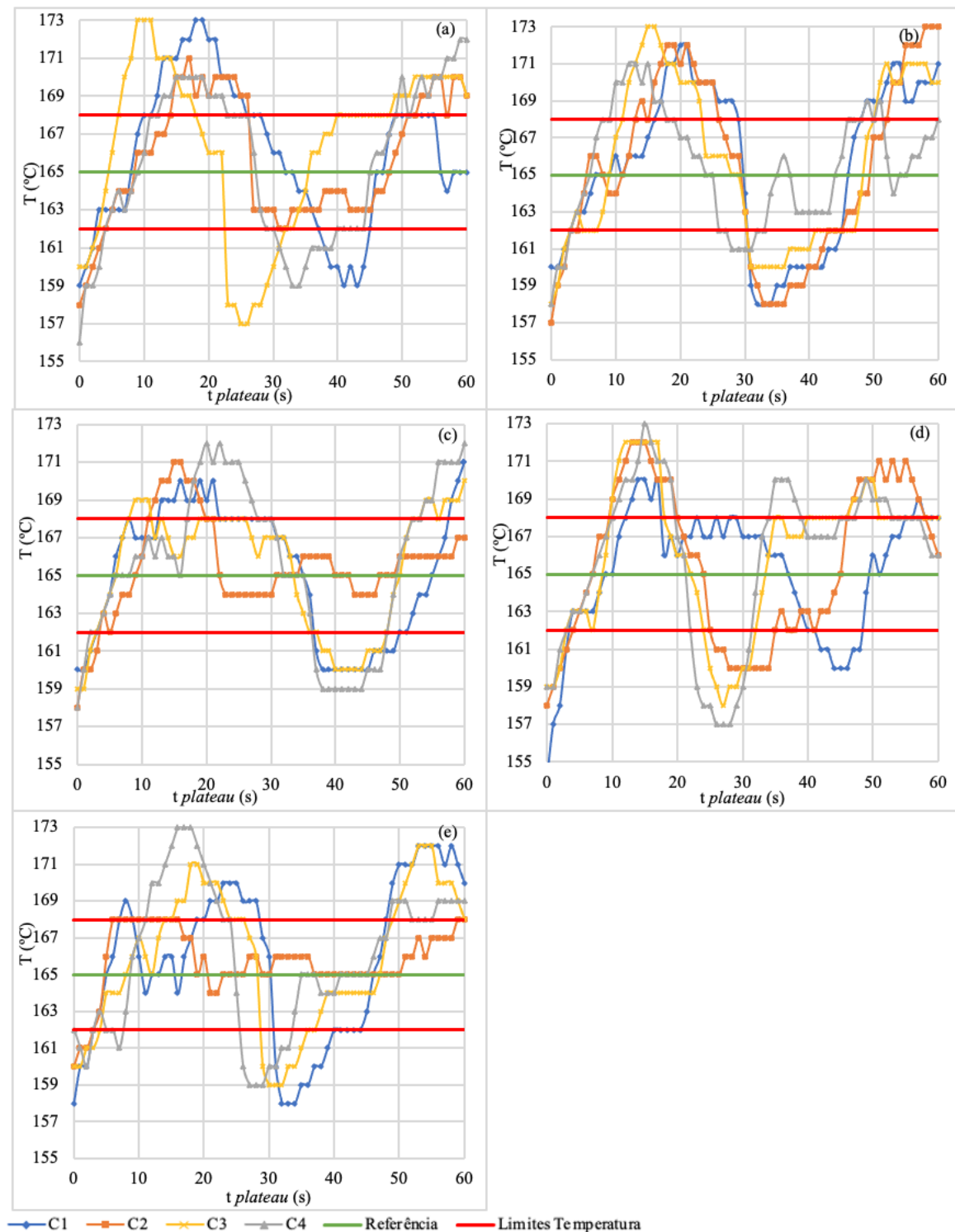


Figura D.1: Representações gráficas relativas ao efeito do tempo integral na temperatura para os seguintes perfis: (a) $K_P=16$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (b) $K_P=17$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=18$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (d) $K_P=19$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s; (e) $K_P=20$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s.

Relativamente, à variável manipulada, através da Figura D.2, é possível observar o comportamento dos rotores durante o passo de *plateau*.

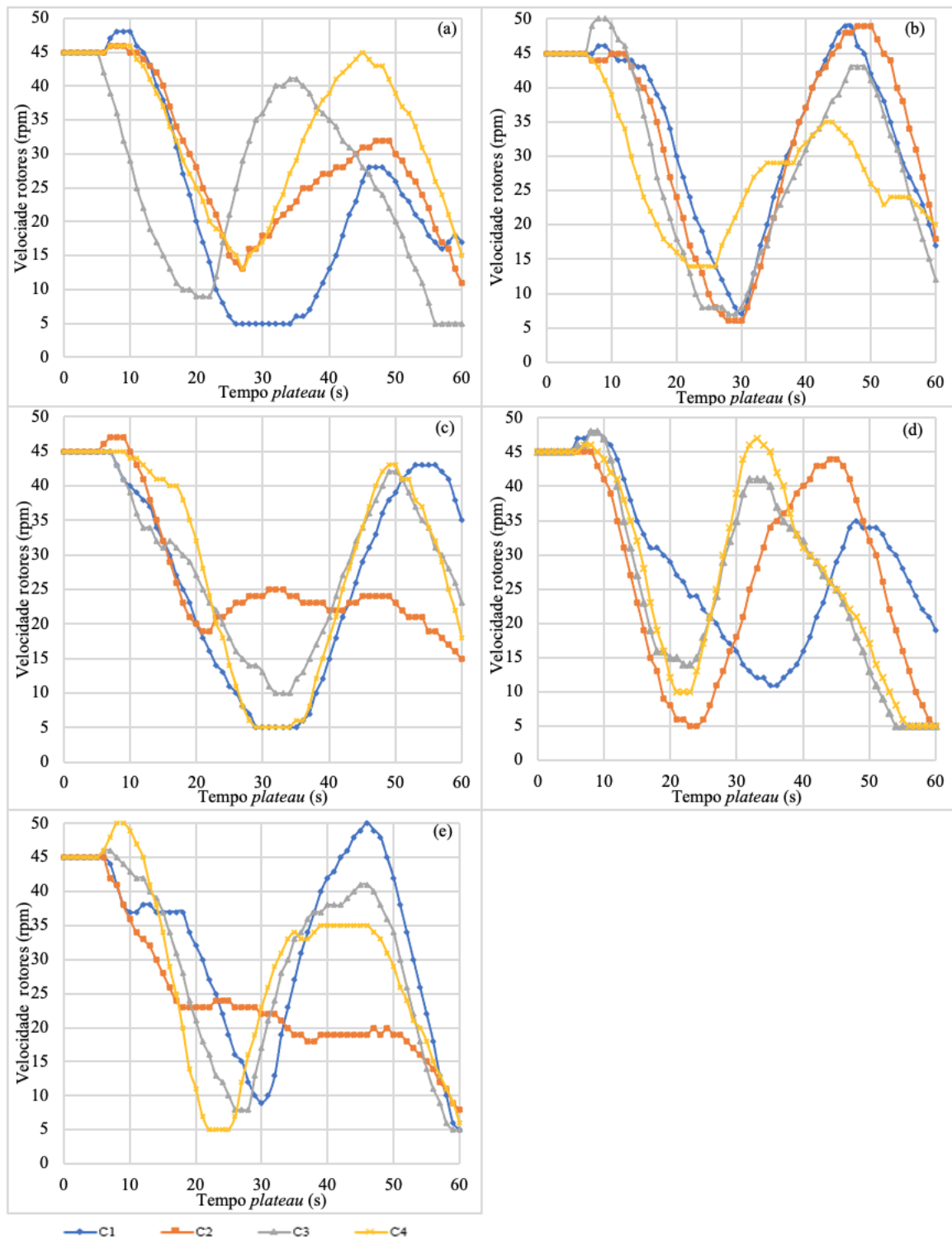


Figura D.2: Representações gráficas da variação da velocidade dos rotores para os seguintes perfis:
(a) $K_P=16$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (b) $K_P=17$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=18$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s (d) $K_P=19$; $\tau_i=1$ s;
 $\tau_D=0$ s; (e) $K_P=20$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s.

Seguidamente, optou-se pela realização de novos testes, no sentido de aumentar, novamente, o ganho proporcional para os dois valores mais baixos de tempo integral. Assim, para o perfil 15, decidiu-se testar com o ganho proporcional de 26 e o integral de 1,5 s, não introduzindo nenhum tempo derivativo e, através da Tabela D.6, é possível observar os valores de temperatura de carga e velocidade dos rotores.

Tabela D.10. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 15 ($K_p=26$; $\tau_i=1,5s$; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	157	159	160	158	45	45	45	45
1	161	159	160	159	45	45	45	45
2	160	160	161	160	45	45	45	45
3	161	162	162	162	45	45	45	45
4	162	164	162	162	45	45	45	45
5	162	165	164	162	45	45	45	45
6	162	166	165	164	45	45	45	45
7	163	168	165	164	46	43	45	46
8	164	168	165	165	47	42	45	46
9	164	168	166	165	48	41	45	45
10	163	168	167	166	48	39	44	46
11	163	168	168	166	48	39	43	45
12	164	168	169	167	48	39	40	43
13	165	168	169	168	48	37	39	42
14	166	169	170	169	48	35	38	41
15	166	168	170	170	46	34	36	39
16	167	169	170	171	46	34	34	37
17	168	169	171	170	44	33	32	35
18	169	168	172	171	43	31	30	33
19	169	169	172	172	42	31	27	30
20	171	168	172	172	40	29	25	27
21	172	168	171	172	37	29	23	25
22	172	168	170	172	34	28	22	22
23	171	168	169	171	32	27	21	20
24	171	169	169	172	31	25	20	19
25	169	168	170	171	29	24	19	16
26	170	169	169	170	29	23	17	15
27	170	168	168	169	27	22	17	14
28	170	168	166	167	25	22	17	14
29	171	168	164	167	23	20	18	14
30	170	168	164	167	21	20	20	14
31	171	168	164	165	20	19	20	14
32	171	168	163	164	18	18	20	15
33	169	168	164	164	16	17	21	15
34	169	167	164	164	16	16	21	16
35	168	168	164	164	14	16	21	16
36	167	168	165	165	15	14	21	16
37	168	166	165	164	14	14	21	16
38	168	165	165	164	13	15	21	16
39	167	165	165	164	13	15	20	17
40	166	165	165	164	12	15	20	17
41	166	164	165	163	12	15	20	18
42	166	164	165	163	12	16	20	19
43	165	164	165	163	12	16	20	19
44	165	164	165	163	12	17	20	20
45	165	164	165	163	13	17	21	21
46	165	164	165	163	13	18	21	22

Tabela D.11. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 15 ($K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
47	165	164	165	163	13	18	21	23
48	165	164	164	163	13	17	21	22
49	165	163	164	164	13	18	22	23
50	166	164	164	165	13	19	22	22
51	166	164	165	165	12	18	22	22
52	166	164	165	166	12	19	22	21
53	166	164	165	164	12	20	21	22
54	167	163	165	164	10	20	21	23
55	166	162	165	164	10	21	21	23
56	166	163	166	164	10	23	21	23
57	165	163	166	165	10	22	21	23
58	166	162	166	165	10	23	20	23
59	165	163	166	165	10	25	20	23
60	163	163	166	166	11	25	20	22

Relativamente ao perfil 16, escolheu-se manter o valor do tempo integral em 1,5 s e aumentar o valor do ganho proporcional para 31, com o objetivo de atingir tempos de resposta mais curtos em relação ao perfil 15. Após obtenção das curvas no sistema MMS, foi possível construir a Tabela D.7 com os valores de temperatura no interior da câmara e velocidade de rotores durante os 60 segundos de *plateau*.

Tabela D.12. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 16 ($K_P=31$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	159	158	158	45	45	45	45
1	161	161	159	159	45	45	45	45
2	162	161	160	161	45	45	45	45
3	162	162	161	162	45	45	45	45
4	163	163	162	163	45	45	45	45
5	163	163	162	164	45	45	45	45
6	163	162	163	166	46	45	45	45
7	164	163	163	166	47	47	47	44
8	164	165	164	167	47	48	48	43
9	165	166	163	168	47	47	49	42
10	166	167	164	168	46	46	50	41
11	166	168	166	167	46	45	49	39
12	167	168	167	166	45	43	48	38
13	167	168	168	164	44	42	47	39
14	167	170	169	165	43	40	45	39
15	165	171	170	166	42	37	42	38
16	166	172	171	168	43	33	39	38
17	168	171	171	170	42	29	36	36
18	170	171	172	171	40	27	33	33
19	171	170	171	170	37	24	29	29
20	170	170	171	171	33	22	26	27
21	171	167	171	169	31	20	23	25
22	170	166	171	169	28	19	20	23
23	171	164	170	169	25	20	17	21
24	169	163	170	167	22	21	15	19
25	170	163	170	167	21	22	12	19
26	169	164	169	167	18	23	10	17
27	169	164	168	167	16	24	9	17
28	168	164	167	167	14	24	7	16

Tabela D.13. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 16 ($K_P=31$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
29	168	164	167	167	12	24	7	15
30	168	165	167	167	10	24	6	14
31	168	165	165	166	9	25	6	13
32	166	165	165	166	8	25	6	12
33	166	166	164	166	7	24	6	12
34	166	166	164	164	8	23	7	12
35	166	166	164	163	7	22	7	13
36	165	167	162	162	7	22	8	15
37	164	166	159	160	7	21	10	17
38	163	166	159	160	8	20	14	20
39	162	166	159	160	9	20	18	22
40	162	166	159	159	11	19	21	25
41	161	166	159	159	13	19	24	28
42	161	166	159	158	15	18	27	31
43	160	166	159	159	18	18	30	35
44	160	166	159	160	20	17	33	38
45	160	166	160	162	22	17	36	40
46	160	166	160	164	25	17	39	41
47	160	166	160	165	28	16	41	40
48	163	166	163	167	31	16	43	40
49	164	165	165	168	30	16	44	38
50	165	165	167	168	31	16	43	37
51	165	165	167	169	30	16	42	35
52	166	166	167	169	30	16	41	33
53	166	166	168	169	29	16	40	31
54	166	166	167	169	29	15	39	29
55	165	166	167	169	28	15	38	27
56	167	166	169	170	28	14	36	25
57	166	166	169	168	27	14	34	22
58	167	166	170	168	26	13	32	21
59	168	166	171	169	25	13	29	20
60	169	166	172	169	23	12	26	17

Por outro lado, para o perfil 17 foi definido usar o valor de ganho proporcional cujo os resultados foram mais satisfatórios e diminuir o valor do tempo integral, assim, o perfil 11 apresenta uma combinação de valores de 26, 1 e 0 para os parâmetros proporcional, integral e derivativo, respetivamente. A Tabela D.8 refere-se aos valores de temperatura e velocidade dos rotores das cargas realizadas com o perfil 11.

Tabela D.14. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 17 ($K_P=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	157	159	158	45	45	45	45
1	160	158	161	160	45	45	45	45
2	162	161	161	162	45	45	45	45
3	162	162	162	162	45	45	45	45
4	163	164	162	163	45	45	45	45
5	163	166	164	165	45	45	45	45
6	164	168	164	166	45	45	45	45
7	164	169	166	167	46	42	45	43
8	166	170	167	166	46	40	44	43
9	166	171	169	167	45	36	43	41
10	166	172	171	168	45	33	40	41

Tabela D.15. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 17 ($K_P=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
11	168	172	169	168	44	30	36	39
12	169	172	170	168	42	25	35	37
13	171	171	172	170	39	21	32	35
14	171	170	171	171	35	19	28	32
15	170	169	171	171	32	16	25	29
16	170	168	171	171	29	14	22	25
17	169	167	170	170	26	12	18	22
18	170	166	170	170	24	11	16	19
19	169	163	169	171	22	12	13	17
20	169	163	167	170	20	14	12	13
21	169	163	167	168	17	15	11	10
22	168	163	167	167	16	16	9	9
23	167	163	167	166	14	17	8	8
24	164	163	167	165	13	18	7	8
25	160	163	166	165	15	19	6	8
26	160	163	165	164	20	21	6	9
27	161	164	163	164	23	21	7	9
28	162	163	162	162	25	21	8	11
29	163	165	161	162	25	22	10	13
30	164	164	162	156	26	23	13	14
31	165	164	162	156	26	23	14	20
32	166	165	163	156	26	22	15	25
33	167	166	162	157	25	22	17	30
34	167	167	162	157	24	22	18	34
35	167	167	164	159	23	21	19	39
36	167	166	163	160	22	20	20	41
37	166	166	162	160	21	19	21	43
38	164	164	162	161	21	19	23	46
39	164	164	161	162	22	20	25	48
40	163	163	161	162	23	21	27	49
41	164	163	161	162	24	22	29	50
42	164	164	161	163	25	23	31	50
43	164	164	162	163	25	23	33	49
44	164	164	163	166	25	24	35	49
45	164	164	165	166	26	25	35	48
46	165	164	166	168	26	26	35	47
47	164	164	166	169	27	26	34	46
48	166	165	168	170	27	25	33	43
49	166	166	168	170	26	25	31	40
50	167	167	168	171	25	24	29	37
51	166	167	168	171	24	23	27	34
52	167	167	168	171	24	22	26	31
53	168	168	166	172	22	21	25	27
54	168	166	167	172	21	19	25	23
55	169	166	167	171	19	19	24	19
56	168	167	168	171	17	18	22	16
57	167	166	168	170	15	17	20	13
58	168	166	168	171	14	17	19	11
59	166	166	168	171	13	17	17	7
60	166	166	169	171	12	16	15	5

Para o último perfil de ajustes, perfil 18, manteve-se o tempo integral com o valor igual a 1 s e, testou-se, novamente, com o valor de ganho proporcional igual a 31, sem introdução do tempo derivativo. A Tabela D.9 refere-se aos valores extraídos para as cargas realizadas com este mesmo perfil.

Tabela D.16. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 18 ($K_p=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	157	160	160	45	45	45	45
1	160	159	161	160	45	45	45	45
2	161	160	161	160	45	45	45	45
3	162	162	162	160	45	45	45	45
4	162	163	163	163	45	45	45	45
5	162	164	162	165	45	45	45	45
6	163	165	164	166	45	45	45	45
7	164	166	165	167	47	45	45	44
8	166	166	167	170	46	44	45	42
9	167	167	167	171	45	43	43	39
10	169	167	169	172	43	42	41	34
11	169	166	169	170	40	41	39	31
12	167	162	170	170	39	40	37	28
13	169	163	171	169	38	44	34	25
14	169	165	171	169	35	44	30	23
15	165	166	172	169	34	43	27	21
16	166	167	171	169	34	42	23	19
17	166	168	171	169	34	40	20	17
18	168	169	170	168	33	38	16	14
19	169	170	169	167	31	36	13	13
20	169	170	169	166	28	33	12	12
21	170	170	168	165	26	30	10	12
22	170	171	168	164	23	27	8	12
23	168	171	167	163	20	24	7	13
24	167	170	165	162	19	20	6	14
25	167	171	158	162	18	18	7	17
26	166	170	158	162	17	14	11	18
27	166	169	158	162	17	11	17	21
28	160	169	158	162	17	10	20	23
29	162	168	158	162	22	8	25	24
30	163	165	158	162	24	7	29	25
31	164	163	159	163	25	8	32	27
32	165	160	160	164	24	10	36	28
33	167	160	161	163	23	13	38	28
34	168	159	164	166	22	16	40	29
35	168	159	166	167	20	20	40	28
36	168	160	166	167	18	23	38	27
37	167	160	167	167	17	26	38	25
38	166	160	167	166	16	29	36	25
39	166	161	166	167	16	31	35	24
40	165	161	165	167	16	34	35	23
41	165	161	165	167	16	36	35	21
42	165	161	165	167	16	38	35	20
43	165	161	165	167	16	40	35	19
44	165	161	166	167	16	43	36	18
45	165	162	167	167	16	45	34	17
46	165	162	166	167	16	47	33	16
47	166	164	168	167	15	48	32	15
48	166	166	169	167	15	47	30	14
49	166	168	170	167	14	46	28	13
50	167	171	169	167	14	43	24	12
51	167	171	170	166	12	40	23	11
52	165	171	169	166	11	36	20	11
53	164	172	168	166	12	32	17	10
54	164	172	168	166	13	28	16	9
55	164	173	168	166	14	24	14	8
56	164	172	168	166	14	19	13	7
57	163	173	168	166	15	15	11	7

Tabela D.17. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 18 ($K_p=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
58	163	173	168	166	16	11	10	6
59	164	172	168	166	17	6	8	5
60	164	171	168	166	17	5	6	5

Anexo E- Testes Práticos com Introdução do Tempo Derivativo

Neste Anexo E, é possível encontrar os valores experimentais obtidos relativos aos testes onde o tempo derivativo foi introduzido, que permitiram a construção das curvas de temperatura e velocidade dos rotores, Figuras 4.13 e 4.14, respetivamente. Para estes testes e tendo em conta as diretrizes gerais de sintonização, considerou-se um intervalo de valores para o tempo derivativo entre 0,2 e 0,5 com um passo de 0,075 entre perfil.

Assim sendo, para o perfil 19 começou-se por testar a seguinte combinação: ganho proporcional de 26, tempo integral de 1,5 s e o tempo derivativo considerou-se um valor mais baixo, igual a 0,225 s. Na Tabela E.1 constam os valores de temperatura de carga e velocidade dos rotores lidos durante o *plateau*.

Tabela E.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 19 ($K_p=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de *plateau*.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	153	160	159	159	45	45	45	45
1	157	162	160	161	45	45	45	45
2	158	162	161	161	45	45	45	45
3	161	162	162	163	45	45	45	45
4	163	161	162	164	45	45	45	45
5	165	162	162	164	45	45	45	45
6	164	162	162	163	45	45	45	46
7	167	164	162	164	45	48	48	47
8	167	164	161	165	43	48	50	47
9	168	166	164	165	41	47	50	47
10	168	167	165	165	39	46	49	47
11	168	168	167	167	38	45	48	46
12	167	168	167	169	37	43	46	44
13	167	169	168	170	36	40	45	40
14	166	170	168	171	35	38	43	37
15	165	170	169	171	35	35	41	33
16	166	171	169	171	35	32	38	30
17	166	170	169	171	34	29	36	27
18	167	170	170	170	33	26	35	24
19	167	169	170	170	32	24	32	21
20	165	170	169	170	31	22	29	19
21	164	169	169	170	33	20	27	17
22	164	168	169	170	33	18	25	14
23	164	168	168	169	34	16	22	12
24	163	167	169	168	34	16	21	11
25	163	167	169	166	36	15	19	10
26	164	166	168	166	37	15	17	10
27	165	166	169	166	36	14	16	10
28	165	166	168	166	37	14	13	9
29	166	166	167	165	35	14	13	9
30	167	165	167	164	35	14	11	9
31	167	165	166	161	33	14	11	10
32	168	165	166	160	31	14	11	14
33	169	164	165	160	30	15	10	17
34	169	164	165	160	27	15	11	20
35	169	163	164	160	24	16	11	22
36	170	163	164	161	23	17	12	24

Tabela E.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 19 ($K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
37	169	163	163	161	20	19	13	26
38	167	163	163	161	18	19	15	28
39	166	163	163	161	18	20	16	30
40	165	163	163	161	19	21	17	32
41	165	163	163	162	19	22	18	34
42	165	163	162	162	19	24	19	35
43	165	163	162	163	19	25	21	36
44	165	163	162	163	19	26	23	38
45	165	163	162	163	19	27	25	38
46	165	163	161	163	19	28	27	39
47	165	163	161	163	19	29	29	40
48	165	163	162	163	19	31	30	41
49	166	163	162	164	19	31	32	42
50	166	165	162	164	18	32	33	42
51	166	164	163	166	18	31	34	42
52	166	165	163	167	17	32	35	40
53	167	165	164	168	16	31	35	39
54	166	166	167	169	15	31	35	37
55	166	165	167	169	15	30	32	35
56	166	167	169	170	14	30	31	32
57	165	166	167	168	14	29	28	29
58	164	168	170	170	15	28	27	28
59	166	167	169	170	15	26	24	25
60	162	169	170	172	15	25	22	22

Após a realização dos testes com o perfil 19 e, visto que, nas cargas com este perfil associado foi visível uma certa influência do tempo derivativo, decidiu-se, para o perfil 20, aumentar o tempo derivativo para um valor igual a 0,300 s, com parâmetros proporcional e integral constantes. Os valores obtidos constam na Tabela E.2.

Tabela E.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 20 ($K_P=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,300$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	158	159	158	160	45	45	45	45
1	160	160	160	159	45	45	45	45
2	160	161	161	161	45	45	45	45
3	163	162	162	162	45	45	45	45
4	163	165	162	163	45	45	45	45
5	164	166	164	164	45	45	45	45
6	165	168	165	164	45	44	45	45
7	166	169	166	164	45	41	45	46
8	165	170	167	164	44	39	43	47
9	165	171	167	165	44	35	42	47
10	166	171	166	167	44	32	41	46
11	166	170	165	168	43	28	42	43
12	166	170	166	169	43	26	41	41
13	168	170	167	170	42	24	40	39
14	169	170	168	172	39	22	39	35
15	169	170	168	173	37	19	37	31
16	170	169	169	172	35	17	35	26
17	170	166	169	172	32	15	33	23
18	170	164	170	171	30	17	30	20
19	169	163	170	170	28	19	28	17

Tabela E.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 20 ($K_p=26$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,300$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
20	170	163	171	170	25	19	24	15
21	169	162	170	169	23	21	21	12
22	170	162	170	168	20	23	19	11
23	169	162	170	167	18	24	16	10
24	169	162	168	167	16	25	15	9
25	169	164	166	167	14	26	14	8
26	168	165	166	167	12	27	14	7
27	168	166	166	166	10	26	13	6
28	167	167	166	165	9	25	13	6
29	166	166	166	165	9	24	13	7
30	164	166	166	164	9	23	13	7
31	162	166	165	164	10	22	12	8
32	162	166	165	164	13	22	12	8
33	162	167	165	164	16	21	13	9
34	162	167	165	164	17	20	13	9
35	162	167	164	163	19	19	13	10
36	162	167	164	160	20	18	14	12
37	162	167	164	158	22	16	15	16
38	162	167	164	158	23	15	16	21
39	162	167	163	158	25	14	17	24
40	161	167	162	158	27	14	18	28
41	162	167	161	157	29	12	20	32
42	162	167	159	158	30	12	23	36
43	162	166	159	158	32	11	26	40
44	162	166	159	159	34	10	29	43
45	162	166	159	161	35	10	32	45
46	162	165	160	164	36	10	36	46
47	162	165	160	166	38	10	38	45
48	164	165	161	167	39	10	40	43
49	166	165	162	168	39	10	41	42
50	164	165	165	169	37	10	42	40
51	166	165	166	169	37	11	40	37
52	166	165	164	169	36	11	39	35
53	167	165	166	170	35	10	40	33
54	168	165	166	168	35	11	40	31
55	166	165	167	168	33	11	38	30
56	169	165	169	168	32	11	36	28
57	169	164	169	169	29	11	34	26
58	171	164	169	168	27	12	32	24
59	170	164	170	169	23	13	30	23
60	171	164	170	170	21	13	27	20

Relativamente ao perfil 21, decidiu-se manter constante os valores dos parâmetros proporcional e integral e, considerou-se o tempo derivativo igual ao cálculo da estimativa inicial, 0,375 s. A Tabela E.3 tem presente os valores para as quatro cargas realizadas com o perfil 21.

Tabela E.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 21 ($K_p=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,375$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	155	159	161	159	45	45	45	45
1	158	161	160	160	45	45	45	45
2	160	161	160	160	45	45	45	45
3	161	161	161	160	45	45	45	45
4	162	163	162	162	45	45	45	45
5	162	162	163	164	45	45	45	45

Tabela E.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 21 ($K_p=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,375$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
6	163	162	162	165	45	45	45	45
7	164	164	164	166	46	48	45	45
8	163	167	166	166	46	46	46	44
9	164	168	168	166	47	44	44	44
10	165	168	169	164	47	42	42	44
11	164	168	170	164	47	40	39	45
12	163	169	171	165	49	38	35	45
13	163	168	171	166	50	36	33	44
14	164	168	172	168	50	34	29	42
15	164	168	172	168	50	33	25	41
16	166	167	172	169	50	32	21	38
17	168	167	170	170	48	32	18	36
18	168	168	170	171	46	31	16	33
19	168	168	170	171	44	29	14	30
20	170	168	169	170	43	28	10	26
21	171	168	166	170	39	26	9	24
22	171	168	166	167	36	24	10	22
23	172	168	165	169	32	22	10	22
24	172	168	165	169	28	21	10	20
25	172	168	160	168	25	19	11	17
26	171	166	160	168	21	18	16	16
27	172	167	160	167	19	18	20	15
28	172	167	160	167	14	16	23	14
29	171	166	161	167	11	16	25	13
30	170	165	162	166	9	16	26	13
31	170	166	163	166	7	16	27	12
32	169	165	163	166	5	16	27	12
33	169	165	164	166	5	16	28	11
34	168	165	164	164	5	16	28	11
35	168	165	165	162	5	16	29	13
36	167	165	165	161	5	16	29	15
37	166	164	165	162	5	16	29	18
38	164	164	166	162	6	17	28	19
39	164	162	166	162	8	18	28	20
40	163	161	166	162	9	21	27	22
41	163	160	166	162	10	24	26	24
42	162	161	166	161	12	26	26	26
43	162	160	166	161	13	28	25	28
44	161	163	166	160	15	31	24	30
45	160	164	166	160	18	30	24	33
46	160	165	166	160	21	30	23	35
47	159	165	166	160	24	30	23	38
48	159	166	166	160	27	29	22	40
49	160	166	166	162	30	28	21	43
50	160	168	166	164	32	27	20	43
51	162	167	167	166	35	26	19	41
52	164	168	167	167	34	25	19	40
53	164	167	167	167	34	23	17	39
54	165	167	168	168	35	23	16	38
55	164	167	168	168	34	21	15	36
56	166	166	168	168	34	21	13	34
57	165	167	168	169	33	21	12	33
58	167	168	168	169	33	19	11	30
59	166	167	168	170	32	17	9	28
60	167	167	168	169	31	17	8	25

Para o perfil 22, testou-se um último valor de tempo derivativo, 0,450 s, superior ao valor obtido como estimativa inicial, de forma a concluir se é ou não possível aumentar mais este parâmetro do controlador, assim sendo, os valores extraídos destes testes para cada carga realizadas, encontram-se na Tabela E.4.

Tabela E.7. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 22 ($K_P=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,450$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	159	156	159	160	45	45	45	45
1	159	158	160	161	45	45	45	45
2	161	160	160	161	45	45	45	45
3	162	162	162	163	45	45	45	45
4	162	163	163	165	45	45	45	45
5	162	164	164	166	45	45	45	45
6	164	165	162	167	45	45	45	45
7	165	166	165	168	46	45	46	42
8	166	167	167	168	45	44	45	40
9	168	167	168	169	44	42	43	38
10	170	168	169	170	41	41	40	35
11	171	168	169	171	38	38	38	32
12	172	167	170	172	34	38	36	28
13	172	167	169	170	30	37	33	25
14	171	167	169	171	27	35	31	23
15	172	167	171	171	24	34	29	20
16	171	166	171	170	21	33	25	17
17	170	167	171	170	18	33	22	15
18	170	167	169	168	15	32	20	12
19	170	168	169	167	13	31	18	12
20	169	168	168	166	11	29	17	12
21	168	168	167	166	9	27	16	12
22	168	170	168	166	8	25	15	11
23	168	171	168	165	6	21	13	11
24	165	170	167	164	6	18	12	12
25	165	169	167	164	7	15	11	13
26	164	169	167	165	8	14	10	14
27	163	168	167	164	9	11	9	14
28	163	167	166	163	10	11	9	15
29	161	166	166	162	11	11	8	17
30	158	165	166	160	14	11	8	19
31	158	165	166	159	19	11	7	23
32	158	160	166	160	23	12	7	26
33	159	159	166	162	27	17	6	28
34	160	159	166	162	29	21	6	29
35	160	161	165	163	32	24	6	31
36	161	161	165	163	34	25	6	31
37	162	161	165	163	36	27	6	32
38	162	160	164	163	37	30	6	33
39	162	160	164	163	38	32	7	35
40	163	160	164	163	39	35	7	35
41	163	160	164	163	40	38	8	36
42	163	160	164	163	41	40	8	37
43	163	160	164	163	42	43	9	37
44	163	160	164	164	43	46	10	39
45	163	161	163	164	44	48	11	39
46	164	162	163	165	45	50	12	40
47	164	165	163	165	45	49	13	39
48	164	168	163	166	45	47	14	38
49	165	170	163	168	46	44	15	37
50	168	169	163	168	45	41	16	36

Tabela E.8. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 22 ($K_p=31$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,450$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
51	168	170	163	168	42	39	17	33
52	169	171	164	169	40	36	18	32
53	170	170	164	167	37	32	18	29
54	169	171	164	169	34	29	18	28
55	171	170	165	169	33	26	18	26
56	172	171	164	170	29	24	19	24
57	173	170	164	169	25	20	19	21
58	172	170	164	169	20	18	20	19
59	173	170	164	170	17	16	20	17
60	172	169	164	170	12	14	20	14

Anexo F- Testes Práticos de Ajuste Final

No presente Anexo F, é possível encontrar os valores experimentais obtidos para os testes com ajuste dos parâmetros proporcional e integral.

Para tal, começou-se por testar, para o perfil 23, a seguinte combinação: tempo derivativo fixa em 0,225 s, o ganho proporcional continuou igual a 26 e calculou-se o valor do tempo integral, de modo a que este seja quatro vezes superior ao valor do tempo derivativo escolhido, obtendo-se o valor de 1 s. A partir da Tabela F.1 é possível observar os valores de temperatura de carga e velocidade dos rotores para este perfil.

Tabela F.1. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 23 ($K_P=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	161	158	161	160	45	45	45	45
1	160	159	161	160	45	45	45	45
2	160	160	160	161	45	45	45	45
3	161	161	161	162	45	45	45	45
4	162	164	162	164	45	45	45	45
5	163	166	164	165	45	45	45	45
6	163	166	165	167	45	45	45	45
7	165	166	165	168	45	44	45	43
8	166	166	166	168	45	44	44	40
9	166	166	167	168	44	43	44	39
10	165	166	168	169	44	42	42	38
11	165	167	170	169	45	42	40	34
12	168	168	170	170	44	40	35	32
13	168	168	170	168	41	38	33	30
14	168	170	170	168	39	36	30	29
15	170	169	171	167	37	33	27	27
16	170	169	170	167	34	31	23	26
17	170	169	170	166	31	29	22	26
18	170	169	168	167	28	27	20	26
19	170	169	166	167	25	25	19	24
20	170	169	167	166	24	24	20	23
21	169	169	167	167	21	21	18	22
22	169	168	167	166	19	19	17	22
23	169	168	167	167	17	18	17	22
24	168	168	167	166	15	16	15	20
25	168	167	164	166	13	15	16	20
26	168	161	164	166	13	15	17	20
27	168	161	165	166	11	21	18	19
28	167	161	164	166	9	23	18	19
29	166	162	164	166	10	25	19	19
30	165	162	164	166	10	26	19	17
31	165	162	164	166	10	28	19	17
32	165	163	164	161	11	30	20	17
33	165	164	165	161	10	30	20	22
34	164	165	165	162	10	30	20	24
35	164	165	165	163	12	29	20	26
36	163	166	165	164	13	30	21	25
37	163	166	165	162	14	29	20	26
38	163	164	165	162	15	29	20	29
39	162	164	165	161	16	30	20	31
40	161	164	165	161	19	31	20	33

Tabela F.2. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 23 ($K_P=26$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
41	159	164	165	160	21	32	20	36
42	159	164	164	160	25	33	21	38
43	159	164	164	161	29	33	22	41
44	159	164	164	162	32	34	22	42
45	159	164	164	163	35	34	23	43
46	161	164	163	164	38	35	24	43
47	162	164	164	165	39	36	25	43
48	164	166	166	167	39	36	25	42
49	166	168	166	169	38	34	23	40
50	167	167	167	169	37	32	23	38
51	167	168	168	169	35	31	21	35
52	167	166	167	170	35	30	19	33
53	166	168	167	170	34	30	19	29
54	167	168	167	171	34	27	17	27
55	167	169	166	171	32	26	17	24
56	168	169	166	171	31	22	17	20
57	168	169	166	171	30	21	16	17
58	168	168	165	169	28	18	16	14
59	168	168	165	169	26	17	16	13
60	168	169	166	170	24	16	16	11

Após a realização dos testes com o perfil 23, decidiu-se modificar o parâmetro da ganho proporcional, uma vez que, teoricamente, adicionando o tempo derivativo, é possível aumentar o ganho proporcional, com o intuito de obter uma combinação de valores mais satisfatória. Assim, o perfil 24 apresenta uma combinação de valores de ganho proporcional igual a 30, o tempo integral de 1 s e tempo derivativo fixo em 0,225 s. Através da Tabela F.2, é possível visualizar os valores obtidos para o respetivo teste.

Tabela F.3. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 24 ($K_P=30$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	159	158	160	158	45	45	45	45
1	160	159	161	159	45	45	45	45
2	160	160	162	161	45	45	45	45
3	161	162	162	161	45	45	45	45
4	164	162	162	162	45	45	45	45
5	165	162	163	163	45	45	45	45
6	166	163	163	164	45	45	46	45
7	167	164	164	164	44	46	48	45
8	168	165	165	163	42	46	47	47
9	168	166	166	166	40	45	47	47
10	169	165	167	167	38	45	45	46
11	170	165	168	168	36	45	44	44
12	171	166	169	168	32	45	42	42
13	172	168	170	168	29	43	39	41
14	172	170	171	169	25	41	36	38
15	170	170	171	169	22	38	33	36
16	170	172	170	171	19	34	29	33
17	170	172	170	170	17	30	27	30
18	169	173	170	171	14	27	25	28
19	168	172	169	170	13	22	23	25
20	167	172	169	169	12	19	20	22
21	167	172	169	168	12	15	19	20

Tabela F.4. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 24 ($K_p=30$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
22	167	171	169	169	10	12	17	19
23	166	170	169	168	9	10	15	16
24	163	169	167	166	10	8	13	16
25	162	169	166	167	12	7	13	16
26	162	168	166	167	14	5	12	15
27	164	165	166	166	15	6	12	13
28	163	164	166	165	15	7	11	14
29	163	162	166	165	17	8	11	14
30	163	161	165	166	18	11	11	14
31	164	157	164	166	18	14	11	13
32	163	156	165	165	19	19	12	14
33	163	156	163	164	20	24	13	14
34	164	156	163	165	21	29	14	15
35	164	157	163	164	21	34	16	14
36	163	158	162	164	22	38	17	16
37	163	159	162	164	23	41	19	16
38	162	160	162	164	24	44	20	17
39	162	161	161	163	26	46	22	18
40	162	161	161	163	28	48	24	19
41	162	161	162	163	29	50	26	20
42	162	161	161	163	30	50	28	21
43	162	161	161	163	32	50	30	22
44	163	161	161	164	33	50	32	23
45	163	162	161	164	34	50	34	24
46	163	164	162	164	35	49	35	23
47	164	166	162	165	36	49	37	24
48	164	166	164	167	35	48	39	23
49	166	168	166	167	36	47	38	21
50	167	169	167	167	34	44	36	20
51	168	169	168	167	32	42	34	19
52	170	170	165	167	30	39	34	18
53	169	169	166	167	27	37	35	17
54	169	171	168	164	25	35	34	17
55	170	172	167	163	23	31	31	19
56	168	172	169	164	21	27	30	20
57	170	173	170	164	20	23	27	20
58	168	172	170	163	16	19	25	21
59	167	170	169	164	16	16	22	22
60	168	171	168	163	15	13	21	22

De modo a ser possível obter resultados mais concretos, decidiu-se criar o perfil 25, com um elevado valor de ganho proporcional, igual a 34, mantendo os valores do tempo integral e derivativo igual a 1 s e 0,225 s, respetivamente. Na Tabela F.3 constam os valores de temperatura e velocidade dos rotores para as quatro cargas realizadas.

Tabela F.5. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 25 ($K_p=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	159	159	158	160	45	45	45	45
1	158	160	159	162	45	45	45	45
2	158	161	161	162	45	45	45	45
3	161	162	162	161	45	45	45	45
4	162	162	163	162	45	45	45	45
5	164	165	164	164	45	45	45	45
6	165	166	165	166	45	45	45	45

Tabela F.6. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 25 ($K_P=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
7	166	167	165	166	45	44	45	45
8	166	167	166	165	44	42	45	44
9	168	168	167	168	44	41	43	44
10	167	168	168	170	41	39	41	40
11	168	169	168	171	40	37	40	38
12	170	170	168	172	38	35	39	34
13	168	169	169	172	34	32	37	29
14	167	169	170	172	34	30	35	26
15	167	169	170	171	33	28	32	22
16	168	170	170	171	32	26	29	19
17	167	169	172	170	31	23	26	17
18	168	169	172	169	30	21	22	14
19	167	168	172	169	28	20	18	13
20	168	168	171	169	27	18	15	10
21	168	168	170	168	25	17	12	8
22	169	168	170	166	24	16	10	8
23	168	167	170	164	22	14	7	8
24	168	167	168	159	20	14	5	10
25	168	167	166	159	18	12	5	16
26	168	166	163	160	17	12	7	19
27	167	165	158	160	15	12	9	22
28	168	165	155	160	15	12	14	25
29	167	166	155	160	13	12	20	27
30	166	166	155	161	13	11	24	30
31	166	165	155	161	12	11	30	31
32	166	165	156	162	13	11	35	33
33	166	164	157	163	12	11	41	34
34	165	165	158	164	11	12	46	35
35	163	165	159	164	12	12	50	35
36	162	165	160	165	15	12	50	35
37	162	163	161	166	16	12	50	34
38	162	162	162	166	18	14	50	33
39	160	162	163	166	20	16	50	32
40	160	161	163	167	24	18	50	31
41	160	160	164	167	26	20	50	30
42	159	159	164	167	29	24	50	29
43	160	160	164	167	32	27	50	28
44	162	161	164	167	34	29	50	27
45	164	162	165	167	35	30	50	27
46	164	163	167	167	35	31	49	26
47	166	164	168	167	34	32	48	24
48	166	165	169	168	33	31	46	23
49	168	166	169	169	32	31	43	20
50	169	166	170	168	30	30	40	18
51	168	167	171	168	28	29	37	18
52	168	167	170	168	27	27	34	16
53	168	167	170	168	25	26	31	15
54	168	166	170	168	23	25	29	13
55	168	167	170	168	21	25	27	12
56	167	166	171	168	20	23	23	10
57	167	167	171	168	20	24	20	8
58	167	167	171	168	18	22	17	7
59	167	164	172	168	17	22	13	5
60	167	165	172	168	17	23	10	5

Seguidamente, foi proposto escolher e fixar um valor de ganho proporcional entre 26 e 30, e testar para os melhores valores obtidos de tempo integral e derivativo. Para tal,

obteve-se os seguintes perfis, o perfil 26 cuja combinação de valores é ganho proporcional igual a 28, tempo integral igual a 1,5 s e tempo derivativo igual a zero; o perfil 27 com ganho proporcional igual a 28, tempos integral e derivativo igual a 1,5 s e 0,225 s, respetivamente; o perfil 28 com ganho proporcional de 28, tempo integral igual a 1 s e tempo derivativo com o valor de 0,225 s. Para além disso, para excluir todas as hipóteses, decidiu-se criar mais dois perfis com o tempo integral de 0,9 s fixando o tempo derivativo em 0,225 s, assim, obteve-se o perfil 10 com ganho proporcional de 26 e o perfil 11 com ganho proporcional de 28.

A partir da Tabela F.4 é possível observar os valores de temperatura de carga e velocidade dos rotores lidos durante o *plateau* para o perfil 26 cujos seus valores estão acima mencionados.

Tabela F.7. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 26 ($K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de *plateau*.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	160	158	161	157	45	45	45	45
1	161	159	160	159	45	45	45	45
2	161	160	161	160	45	45	45	45
3	162	162	162	162	45	45	45	45
4	162	162	165	161	45	45	45	45
5	163	163	167	163	45	45	45	45
6	163	164	170	163	45	45	45	45
7	164	164	172	164	45	46	42	47
8	166	165	173	165	46	46	37	47
9	167	166	173	166	45	46	31	46
10	170	166	173	166	43	45	26	45
11	170	167	173	166	39	44	22	45
12	169	168	171	167	36	42	18	44
13	169	169	171	169	35	40	16	42
14	169	169	170	170	33	38	13	39
15	170	169	170	171	31	36	11	36
16	170	169	169	171	28	33	9	33
17	170	169	168	172	26	31	7	29
18	169	169	168	172	24	29	6	25
19	169	168	163	172	21	26	6	22
20	169	169	162	170	20	25	10	18
21	169	167	162	169	18	24	11	17
22	169	167	161	169	15	24	14	16
23	169	167	159	169	14	23	16	13
24	168	166	157	168	12	21	21	11
25	168	167	157	167	12	22	25	10
26	166	166	158	166	10	21	29	10
27	165	166	159	166	11	20	33	11
28	165	166	159	166	11	20	36	10
29	165	166	160	165	11	19	38	10
30	165	163	161	164	11	18	40	11
31	164	160	162	163	12	21	42	12
32	164	160	163	162	12	26	43	13
33	164	162	164	164	13	28	43	15
34	164	162	166	164	14	29	43	14
35	164	162	167	164	15	31	41	15
36	164	163	168	164	15	31	39	16
37	164	163	168	163	15	32	38	17
38	164	163	168	163	16	33	36	17

Tabela F.8. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 26 ($K_p=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
39	163	164	169	162	17	34	34	19
40	162	164	169	160	19	35	32	21
41	162	164	169	160	20	35	30	24
42	161	164	169	160	22	36	28	28
43	162	164	168	160	24	37	25	30
44	163	163	168	161	25	38	24	32
45	163	164	168	162	26	38	22	35
46	164	165	168	162	27	38	21	36
47	164	165	168	164	27	38	19	37
48	167	168	168	164	26	37	17	36
49	166	168	168	166	25	35	16	35
50	167	168	168	169	23	32	14	34
51	167	169	168	167	22	31	12	31
52	167	169	168	168	22	29	10	30
53	167	171	168	167	20	27	9	28
54	165	170	168	168	20	23	7	27
55	166	170	168	167	20	20	5	26
56	166	169	168	168	19	17	5	26
57	164	168	168	168	19	16	5	23
58	164	169	168	168	20	15	5	22
59	163	169	168	168	20	13	5	20
60	163	168	167	168	23	11	5	19

De seguida, através da Tabela F.5, é possível observar os valores obtidos para o teste prático realizado com o perfil 27.

Tabela F.9. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 27 ($K_p=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	150	160	156	161	45	45	45	45
1	154	161	158	160	45	45	45	45
2	156	162	160	161	45	45	45	45
3	160	162	162	162	45	45	45	45
4	162	163	164	163	45	45	45	45
5	163	163	164	163	45	45	45	45
6	163	164	165	164	45	45	45	45
7	162	165	166	164	46	46	44	46
8	164	167	167	166	48	45	43	45
9	165	168	167	167	47	43	41	44
10	164	170	167	167	47	41	41	43
11	164	171	169	165	48	38	39	41
12	167	170	169	166	48	33	36	42
13	169	170	169	168	45	31	35	41
14	170	169	169	167	42	29	32	39
15	169	170	169	168	40	27	30	38
16	170	170	169	169	37	24	28	36
17	170	170	169	169	35	22	26	33
18	170	169	169	170	32	19	23	31
19	170	168	168	172	29	17	22	27
20	168	168	167	174	27	17	22	24
21	168	166	167	172	26	15	20	18
22	166	166	166	171	25	16	19	14
23	167	165	166	171	25	15	19	12
24	167	165	166	170	24	16	18	9

Tabela F.10. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 27 ($K_p=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
25	167	163	165	168	24	16	18	7
26	167	164	166	166	22	18	18	7
27	167	163	165	165	20	19	17	7
28	167	162	165	164	20	20	18	8
29	166	161	164	159	18	22	18	9
30	165	161	165	158	19	25	18	14
31	162	161	165	158	21	27	18	18
32	162	162	164	158	23	29	18	23
33	163	162	165	159	24	30	19	27
34	163	163	165	161	25	31	18	30
35	163	163	165	163	27	32	18	30
36	163	164	164	163	28	33	19	31
37	164	165	163	162	28	33	20	32
38	163	165	162	162	29	32	21	34
39	163	165	161	162	30	33	24	35
40	163	165	161	162	31	32	27	37
41	163	165	161	162	32	32	29	38
42	163	165	161	162	34	32	31	39
43	163	165	161	163	34	31	33	40
44	163	165	161	165	35	31	36	41
45	163	165	162	166	36	31	38	40
46	165	165	164	168	37	31	38	38
47	166	165	166	169	36	31	38	36
48	166	166	167	169	35	31	37	33
49	166	166	168	170	35	30	35	31
50	168	166	168	169	33	30	33	29
51	169	166	168	169	31	29	31	27
52	168	167	169	168	29	28	30	25
53	169	167	168	169	27	27	27	24
54	168	167	169	167	25	26	26	22
55	169	168	168	168	24	24	23	21
56	168	168	168	168	21	22	22	19
57	168	168	168	166	20	20	20	19
58	169	168	167	167	18	19	20	18
59	169	169	167	168	15	17	19	17
60	168	169	168	167	14	15	17	15

Já na Tabela F.6 constam os valores de temperatura e velocidade dos rotores lidos para as quatro cargas realizadas com o perfil 28.

Tabela F.11. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 28 ($K_p=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	159	157	159	161	45	45	45	45
1	160	159	160	160	45	45	45	45
2	161	160	161	160	45	45	45	45
3	162	162	162	162	45	45	45	45
4	163	164	163	163	45	45	45	45
5	164	165	164	163	45	45	45	45
6	165	165	166	163	45	45	45	45
7	165	164	168	163	45	44	44	47
8	167	164	167	164	45	46	41	48
9	168	164	167	168	42	46	41	47
10	169	166	166	168	40	46	40	43
11	170	168	166	168	38	44	40	41

Tabela F.12. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 28 ($K_p=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
12	170	170	166	169	34	41	39	40
13	170	170	166	168	31	38	38	37
14	169	168	168	168	29	36	38	35
15	170	170	169	167	27	35	36	35
16	170	169	169	168	24	32	33	34
17	170	170	169	168	22	30	31	32
18	169	169	169	169	20	27	29	30
19	168	170	167	168	17	24	28	28
20	169	169	168	168	16	22	27	26
21	169	169	168	167	14	21	25	26
22	167	168	168	168	13	19	24	24
23	166	167	168	167	12	18	21	22
24	166	168	167	168	13	18	20	21
25	167	168	168	168	11	15	20	20
26	167	166	168	167	10	15	18	18
27	165	165	167	167	10	15	17	18
28	165	166	167	167	11	15	17	17
29	164	165	167	167	11	14	15	16
30	166	165	166	167	11	15	15	15
31	165	165	166	167	10	14	14	14
32	161	165	166	166	11	15	14	13
33	163	165	166	166	15	14	13	13
34	163	165	166	165	15	15	13	12
35	164	164	166	166	16	15	13	13
36	164	164	165	166	16	16	13	12
37	162	164	165	164	17	16	12	12
38	162	164	165	163	19	17	12	14
39	161	164	164	162	21	17	13	16
40	160	163	164	162	24	19	14	17
41	160	163	162	161	27	20	15	20
42	161	162	162	161	29	21	17	22
43	161	162	161	160	31	23	19	24
44	164	162	161	160	32	24	21	27
45	165	162	161	160	31	26	23	30
46	166	162	162	160	30	28	25	33
47	166	162	163	161	30	29	26	35
48	167	163	165	164	29	30	26	35
49	168	163	165	166	27	31	25	34
50	169	164	166	166	25	31	25	33
51	168	164	166	167	23	32	24	32
52	168	165	167	167	21	32	23	31
53	165	165	166	168	21	32	22	30
54	165	166	166	169	22	31	21	27
55	165	168	167	169	21	30	21	25
56	164	167	165	168	22	27	20	23
57	166	167	163	169	23	27	21	22
58	167	167	165	169	21	26	22	19
59	166	166	165	168	19	25	22	17
60	167	168	164	169	19	24	22	16

Por outro lado, a Tabela F.7 diz respeito aos valores de temperatura e de velocidade dos rotores obtidos através do teste com a utilização do perfil 29, cujo o valor de tempo integral diminuiu para 0,9 s.

Tabela F.13. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 29 ($K_p=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	161	160	156	160	45	45	45	45
1	162	160	158	160	45	45	45	45
2	162	160	160	160	45	45	45	45
3	162	161	162	161	45	45	45	45
4	163	162	162	163	45	45	45	45
5	165	163	163	164	45	45	45	45
6	165	164	162	165	45	45	45	45
7	166	163	163	166	45	45	46	44
8	165	164	164	167	44	47	47	43
9	165	164	165	168	44	48	47	41
10	166	163	166	169	44	48	47	40
11	168	164	167	170	43	49	45	37
12	168	165	168	171	40	48	44	34
13	169	166	168	171	38	48	42	30
14	170	166	168	172	36	47	40	27
15	170	167	169	171	33	46	38	22
16	170	167	170	171	30	44	36	20
17	170	169	171	168	27	43	32	18
18	170	170	172	167	25	40	29	17
19	170	169	171	168	22	37	25	17
20	169	170	172	168	20	35	22	14
21	170	171	170	167	19	32	18	13
22	169	171	169	165	16	29	16	13
23	168	171	169	163	14	26	15	15
24	168	170	169	163	13	23	13	17
25	168	169	168	162	11	20	11	18
26	168	169	166	163	9	19	11	19
27	166	169	165	165	9	16	11	19
28	164	168	166	165	10	14	11	19
29	164	165	166	164	10	13	11	19
30	165	164	165	165	12	16	10	20
31	165	164	163	166	11	16	12	18
32	165	164	163	166	11	16	13	18
33	163	165	164	166	12	17	15	18
34	163	166	163	166	13	15	15	17
35	164	165	162	166	15	15	17	16
36	164	164	161	165	15	16	19	16
37	163	164	162	164	16	16	21	17
38	162	162	160	164	17	16	23	17
39	161	162	159	163	20	19	26	19
40	160	161	159	163	22	21	30	20
41	160	161	159	162	25	24	33	22
42	159	160	159	162	29	26	36	23
43	159	160	158	162	31	28	39	25
44	160	160	159	162	35	31	43	27
45	162	160	160	161	36	34	46	29
46	164	160	162	162	37	36	48	31
47	164	161	164	163	37	38	48	31
48	166	162	165	165	36	40	48	31
49	167	162	166	165	35	41	47	31
50	168	164	168	167	33	42	45	30
51	168	166	168	167	31	41	44	29
52	166	166	167	165	31	40	42	28
53	164	167	168	165	32	39	41	29
54	165	165	169	166	33	39	39	28
55	166	166	168	166	32	39	36	27
56	166	168	170	167	32	38	35	26
57	165	168	170	166	31	35	32	25
58	166	168	170	168	32	34	29	25

Tabela F.14. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 29 ($K_p=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
59	166	169	171	166	30	33	26	23
60	166	168	171	167	30	30	23	23

Finalmente, antes de se proceder à escolha da melhor combinação de valores obtida, ainda se realizou o teste prático com o perfil 30, sendo que, os seus valores de temperatura e velocidade obtidos encontram-se na Tabela F.8.

Tabela F.15. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 30 ($K_p=28$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau.

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
0	162	161	158	157	45	45	45	45
1	160	161	160	159	45	45	45	45
2	162	159	160	161	45	45	45	45
3	162	161	161	162	45	45	45	45
4	159	163	162	165	45	45	45	45
5	161	163	163	166	45	45	45	45
6	163	164	164	168	46	45	45	45
7	163	165	164	169	48	45	46	41
8	165	166	163	170	49	45	46	39
9	166	167	165	170	47	43	47	36
10	168	168	166	169	46	42	46	34
11	169	168	167	169	44	39	46	31
12	170	169	167	169	41	38	44	30
13	170	169	168	168	38	35	43	28
14	171	169	169	168	36	33	40	26
15	170	169	170	168	32	31	39	25
16	171	169	171	168	30	29	35	24
17	170	170	171	167	27	27	32	22
18	170	168	169	167	24	24	28	21
19	169	168	170	167	22	24	27	21
20	170	168	170	167	20	22	24	19
21	169	167	170	166	17	20	22	19
22	168	167	169	166	15	20	19	19
23	169	167	168	166	14	19	18	18
24	168	166	168	166	12	18	17	17
25	167	166	168	166	11	18	15	18
26	166	167	168	166	10	16	14	16
27	166	166	167	166	10	16	12	16
28	166	160	166	165	9	15	11	15
29	163	160	167	166	9	19	11	16
30	162	160	166	165	13	24	10	15
31	161	161	165	165	15	26	10	16
32	161	163	164	164	17	27	11	16
33	161	162	164	164	20	28	12	17
34	161	164	165	163	22	29	13	17
35	161	165	165	162	24	28	12	19
36	161	166	165	162	26	29	12	21
37	161	165	163	161	29	28	13	23
38	161	164	162	161	31	28	15	26
39	160	163	162	161	33	29	17	28
40	161	164	161	161	36	30	19	30
41	161	164	160	161	38	31	21	32
42	161	164	160	161	40	31	24	34
43	161	164	161	162	41	32	26	36

Tabela F.16. Registo dos valores de temperatura e velocidade dos rotores de cada carga realizada com perfil 30 ($K_P=28$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s), durante os 60 segundos de plateau (continuação).

t (s)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{C4} (°C)	V _{C1} (rpm)	V _{C2} (rpm)	V _{C3} (rpm)	V _{C4} (rpm)
44	161	163	161	162	44	33	28	37
45	161	164	163	164	46	34	30	39
46	162	164	163	164	48	34	30	39
47	164	165	164	162	48	34	31	40
48	165	166	164	163	48	34	31	41
49	166	166	166	164	47	33	31	42
50	166	168	166	164	46	31	29	42
51	167	169	166	167	45	29	29	41
52	168	169	165	168	45	26	29	39
53	168	168	166	168	42	25	29	37
54	168	168	164	168	41	23	29	35
55	169	168	166	169	39	21	30	33
56	170	169	166	170	36	20	28	31
57	171	168	168	171	33	17	28	28
58	170	165	167	171	30	18	25	24
59	170	165	168	171	28	19	24	21
60	170	165	168	171	25	19	22	18

Na Figura F.1 encontram-se presentes as restantes curvas de temperatura no interior da câmara de misturação para o conjunto de testes de ajuste final dos perfis cujos resultados obtidos não foram tão relevantes.

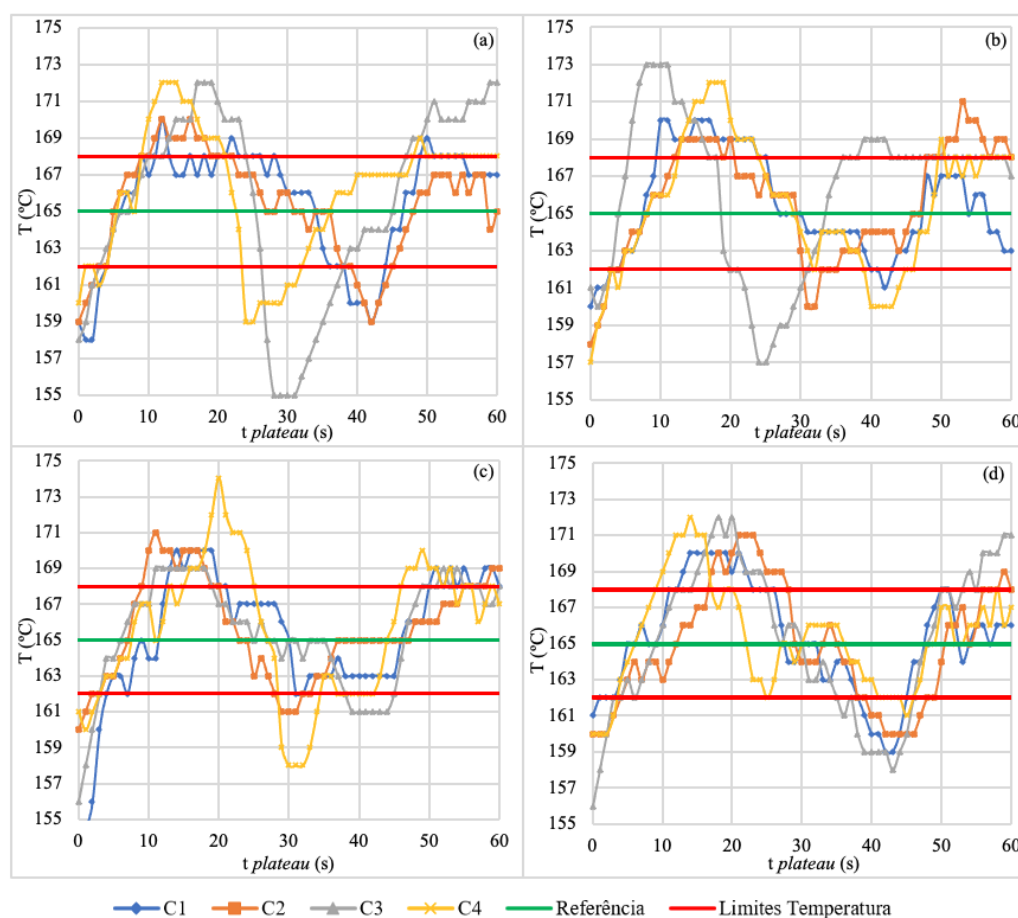


Figura F.1: Representações gráficas da temperatura no interior do misturador em função do tempo para os seguintes perfis: (a) $K_P=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s (b) $K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_P=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s (d) $K_P=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s.

Relativamente às curvas da velocidade dos rotores, estas encontram-se na Figura F.2.

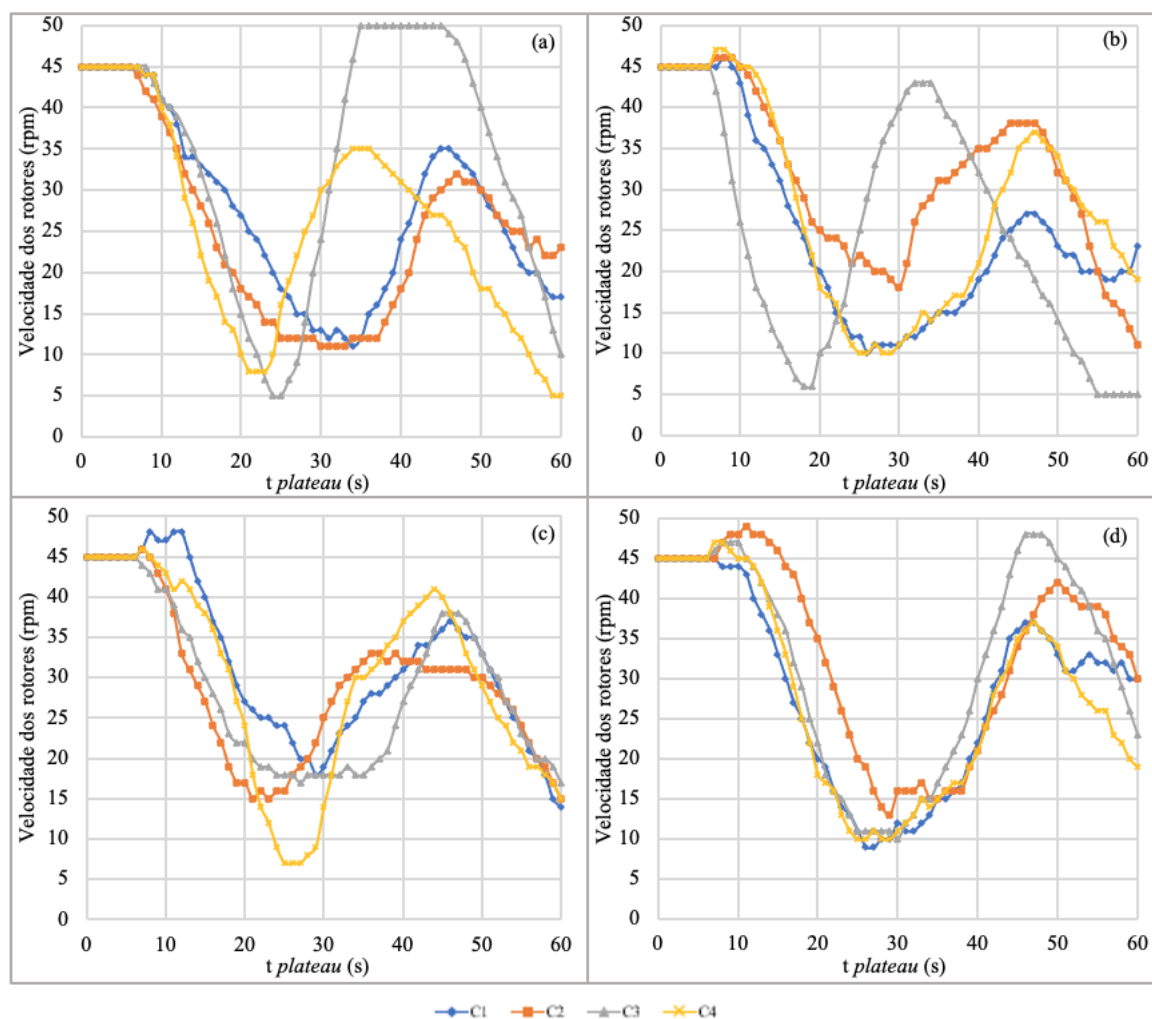


Figura F.2: Representações gráficas da variação da velocidade dos rotores para os seguintes perfis:
(a) $K_p=34$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s (b) $K_p=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0$ s (c) $K_p=28$; $\tau_i=1,5$ s; $\tau_D=0,225$ s (d)
 $K_p=26$; $\tau_i=0,9$ s; $\tau_D=0,225$ s.

Anexo G- Testes Práticos para Validação da Combinação Escolhida

Tal como foi mencionado no subcapítulo 4.4, testou-se a melhor combinação dos parâmetros de controlo em vários compostos de produção normal. O presente Anexo G, apresenta os resultados obtidos para dois dos composto testados, compostos D e F.

Composto D

O composto D foi testado no misturador 10 da empresa, sendo que, por isso, também possui dois passos de *plateau*, o Passo 8 e o Passo B2. As Figuras G.1 e G.2 dizem respeito ao primeiro e ao segundo *plateau* existente durante a etapa de misturação, respetivamente. As curvas apresentadas, são relativas ao comportamento da temperatura das cargas e da velocidade dos rotores, com o uso do perfil final escolhido e do perfil utilizado, atualmente, pela empresa, sendo que, para este último, existe uma restrição na velocidade dos rotores, uma vez que, os rotores apenas alcançam velocidades entre os 25 e 5 rotações por minuto. A Figura G.1 é referente as curvas do passo 8, para ambos os perfis mencionados acima, ocorrendo no primeiro misturador com uma duração total de 20 segundos.

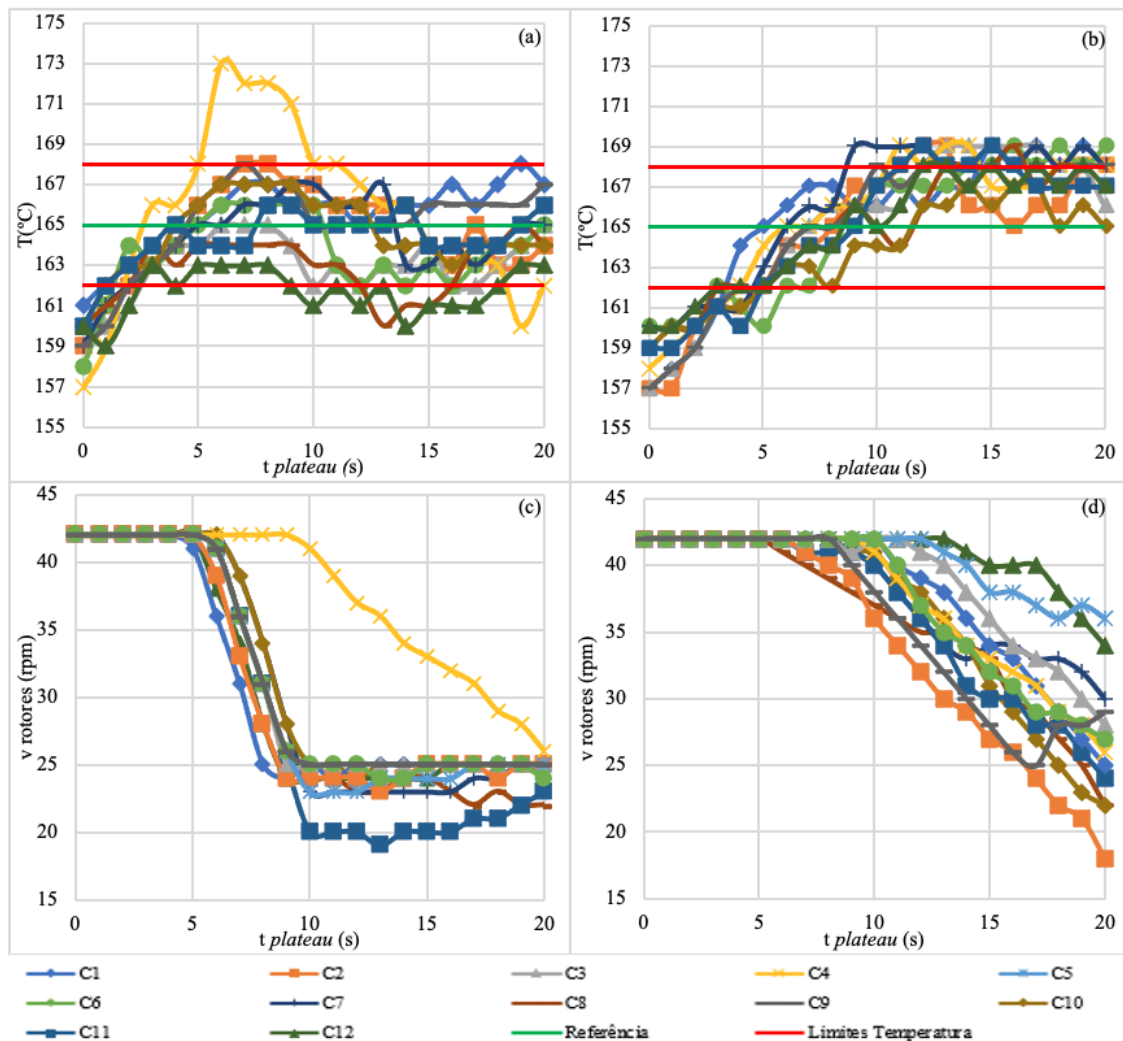


Figura G.1: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_p=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_p=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s.

Na Figura G.2 encontram-se as curvas de temperatura e velocidade dos rotores para o passo B2, que ocorre no segundo misturador, com um tempo de *plateau* igual a 80 segundos e uma temperatura de referência igual a 80 segundos.

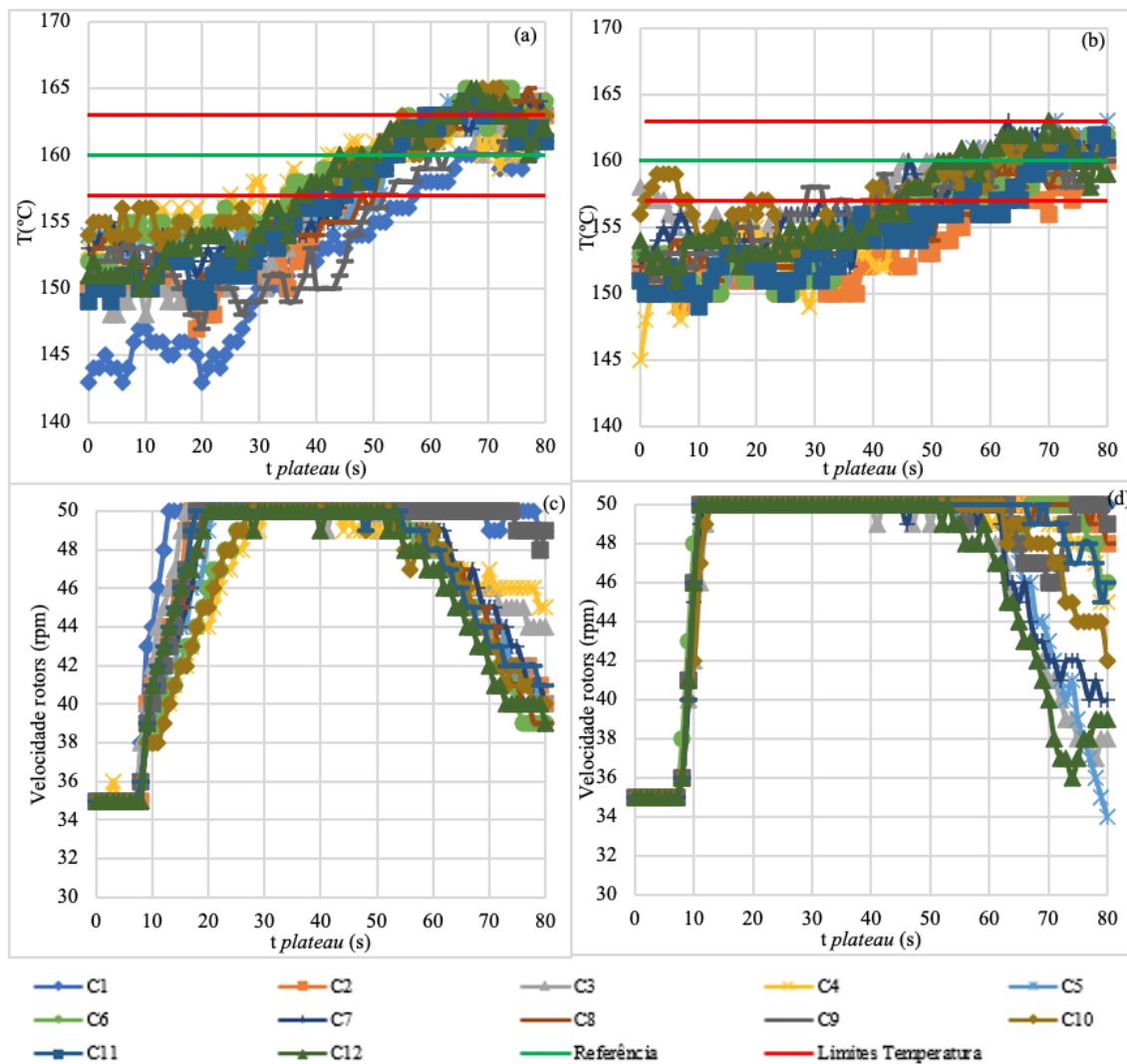


Figura G.2: Representações gráficas obtidas no passo B2 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_p=11$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (d) $K_p=28$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$.

Composto F

Como acontece com os outros compostos, também o composto F é produzido no misturador estudado, apresentando na sua receita duas etapas de *plateau*, uma em cada misturador. As curvas de temperatura e de velocidade dos rotores para o primeiro e segundo *plateau* encontram-se nas Figuras G.3 e G.4, respetivamente, para o Passo 8 e para o Passo B2. De notar que, para este composto em específico, a velocidade dos rotores no primeiro *plateau* está restringida entre 25 e 10 rotações por minuto.

A Figura G.3 é referente as curvas obtidas da primeira etapa de *plateau*, passo 8, com duração de 10 segundos.

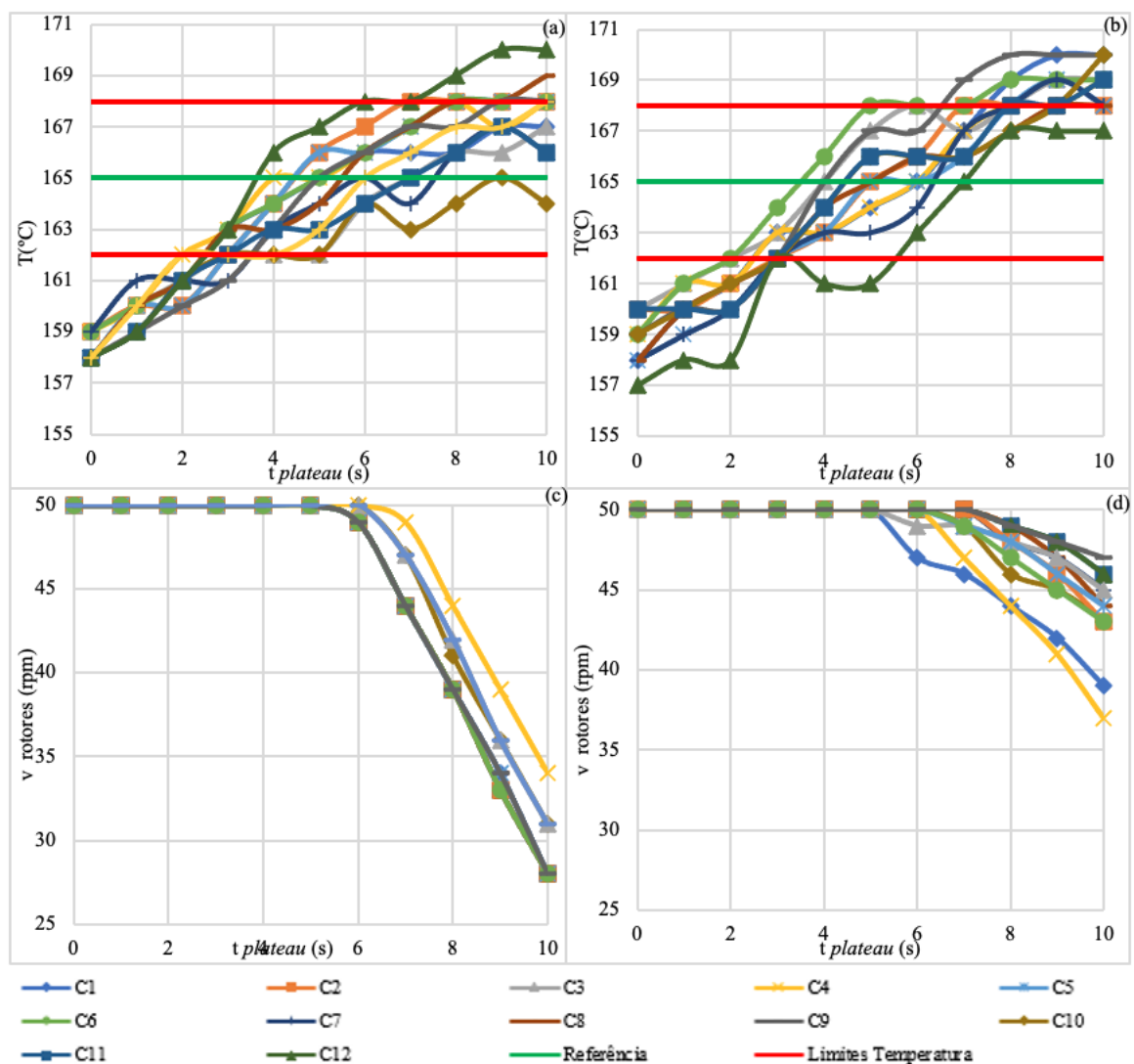


Figura G.3: Representações gráficas obtidas no passo 8 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_P=11$; $\tau_i=2,5$ s; $\tau_D=0$ s; (b) e (d) $K_P=28$; $\tau_i=1$ s; $\tau_D=0,225$ s.

Na Figura G.4 encontram-se as curvas de temperatura e velocidade dos rotores para o passo B2 que ocorre no segundo misturador com um tempo de *plateau* igual a 55 segundos e uma temperatura de referência de 157°C.

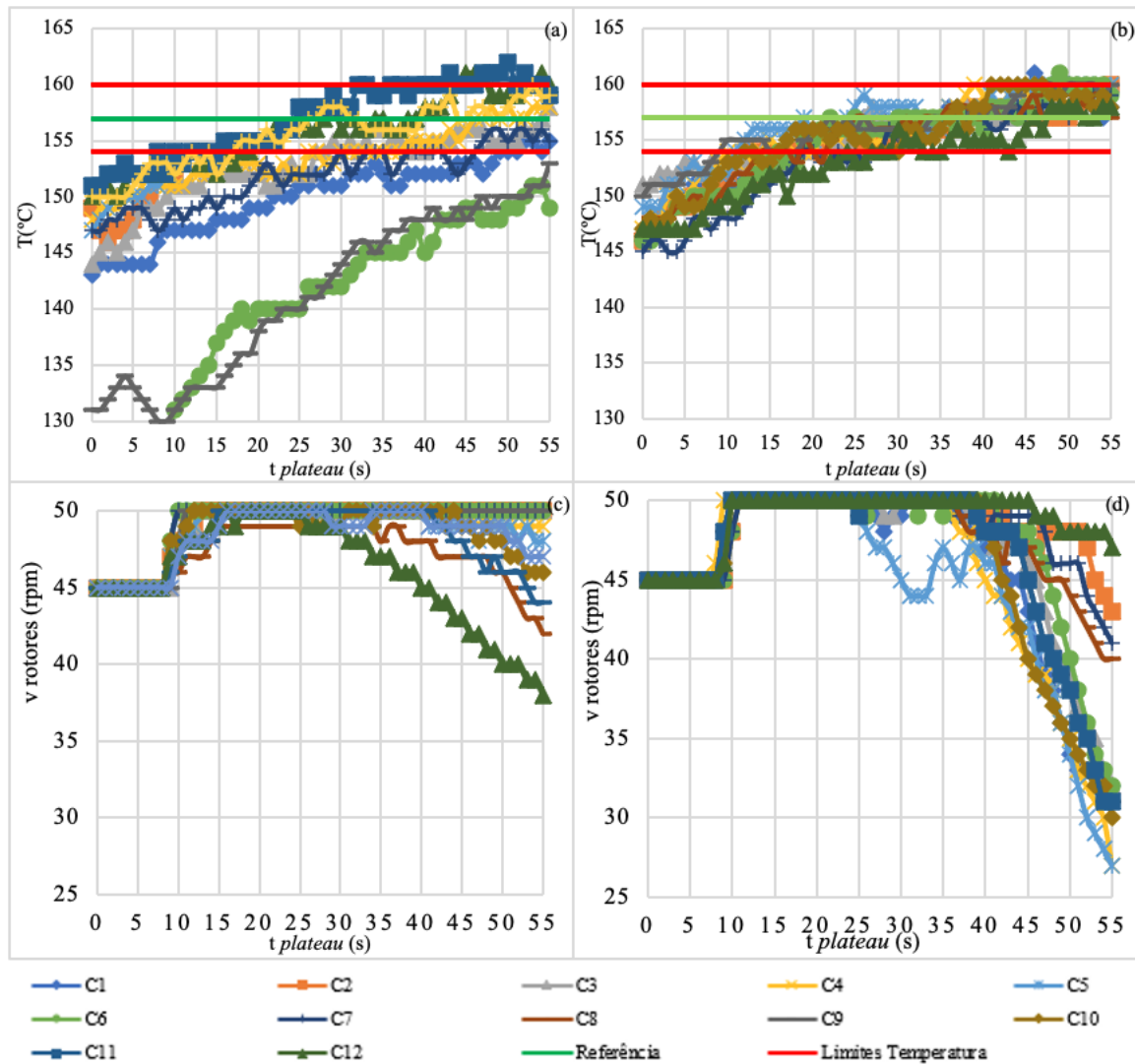


Figura G.4: Representações gráficas obtidas no passo B2 da temperatura no interior do misturador (a)(b) e da velocidade dos rotores (c)(d) em função do tempo para os seguintes perfis, respetivamente: (a) e (c) $K_p=11$; $\tau_i=2,5 \text{ s}$; $\tau_D=0 \text{ s}$; (b) e (d) $K_p=28$; $\tau_i=1 \text{ s}$; $\tau_D=0,225 \text{ s}$.

Anexo H- Comparação do Perfil Atual com o Perfil Escolhido

A título exemplificativo, é possível mostrar pelas Figuras H.1 e H.2, as representações gráficas da etapa de misturação do composto B, extraídas da ferramenta do MMS, relativamente à situação antes e depois da otimização dos valores dos parâmetros do controlador PID.

Por um lado, na Figura H.1, estão representadas, referente à carga número cinco do primeiro conjunto de testes práticos, as curvas de temperatura, velocidade dos rotores, energia envolvida no processo e elevações efetuadas pelo martelo pneumático sempre em função do tempo total de misturação, resultado do teste realizado com o perfil que é utilizado atualmente nos misturadores. Estas curvas foram retiradas, diretamente, do sistema MMS.

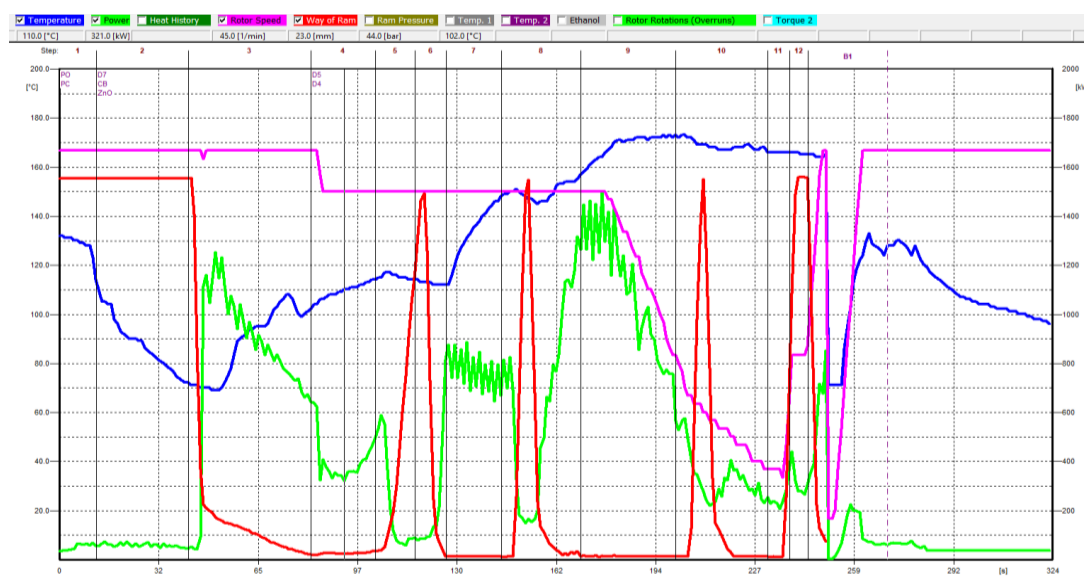


Figura H.1: Representação gráfica das curvas de temperatura (azul), velocidade dos rotores (rosa), energia envolvida no processo (verde) e elevações do martelo (vermelho) em função do tempo de plateau para o perfil: $K_p=11$; $\tau_i=2,5$; $\tau_D=0$.

Por outro lado, na Figura H.2 são apresentadas, referente à carga número dois dos testes práticos de ajuste final, as curvas de temperatura, velocidade dos rotores, energia envolvida no processo e elevações efetuadas pelo martelo pneumático sempre em função do tempo de misturação, que resultaram da utilização dos parâmetros finais escolhidos.

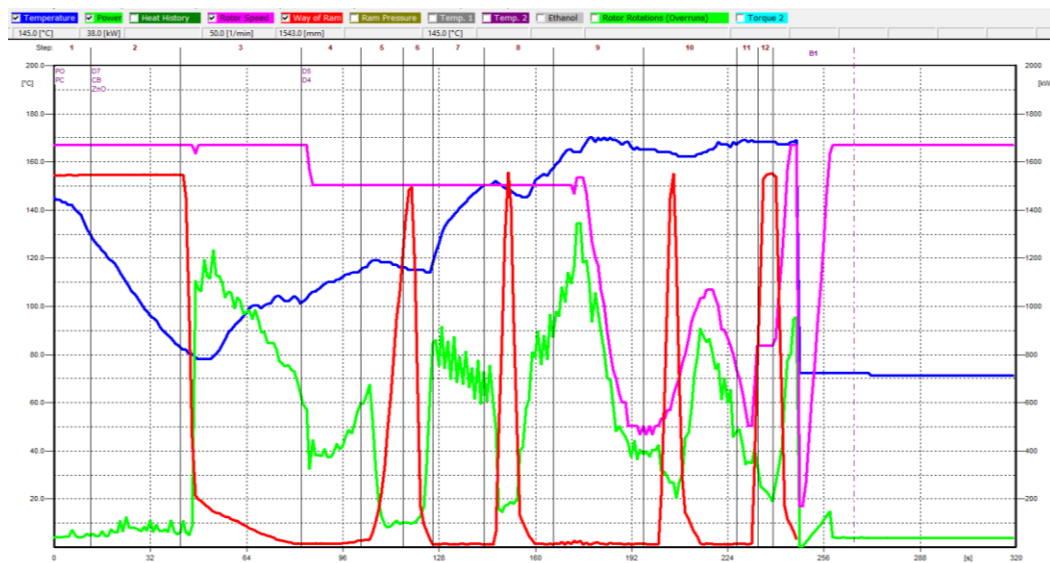


Figura H.2: Representação gráfica das curvas de temperatura (azul), velocidade dos rotores (rosa), energia envolvida no processo (verde) e elevações do martelo (vermelho) em função do tempo de plateau para o perfil: $K_p=28$; $\tau_i=1$; $\tau_D=0,225$.