

***Retrofitting* de uma Prensa Hidráulica para Adequação aos Conceitos da Indústria 4.0**

Tiago Rocha e Silva

Dissertação de Mestrado

Orientador FEUP: Prof. Fernando Gomes de Almeida

Coorientadores no INEGI: Doutor Luís Pina, Eng. Fernando Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

03/2021

Para os meus pais.

Resumo

O objetivo desta dissertação foi o de realizar um processo de *retrofit* num equipamento, nomeadamente uma prensa hidráulica com pratos aquecidos, de forma que este se encontrasse em conformidade com os conceitos da Indústria 4.0. Esta prensa está inserida num conjunto de equipamentos da Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas do INEGI, sendo que o equipamento será eventualmente integrado numa rede de comunicação interna onde estarão ligados os vários equipamentos laboratoriais das várias unidades do INEGI.

De maneira a alcançar os objetivos definidos, foi primeiro efetuada uma revisão bibliográfica da Indústria 4.0 para melhor compreender os seus aspetos mais importantes e que conceitos se consideram como sendo essenciais na sua execução. O equipamento foi então descrito, desde o seu modo de funcionamento, controlo e capacidades, sendo identificados os pontos onde este falha ou mostra incompatibilidades com os conceitos da I4.0, definindo assim os objetivos a alcançar com o processo de *retrofit*. A prensa foi então dividida em subsistemas, sendo descrito o que se pretende alterar em cada um deles e que equipamentos serão usados para o efeito. O novo sistema, composto pelos diversos subsistemas, é controlado por um PLC, tendo sido realizado a programação deste e criado uma interface de controlo gráfica. A interação com a futura rede do INEGI é definida, sendo especificadas as capacidades remotas programadas. Foram também realizados os esquemas elétricos necessários e esquematizado a organização de um novo quadro de manobra, que conterá os novos equipamentos eletrónicos da prensa. Finalmente, utilizando as ferramentas de auto ajuste do PLC, foram estimados e testados os parâmetros de um controlador PID para o controlo de força, sendo que para o controlo de temperatura se utilizou o controlador integrado num termorregulador e, para o controlo da posição, foi programado um controlador *on/off*, com compensação de *setpoint*.

Assim, foi concluído que a Indústria 4.0 se baseia principalmente na interligação dos mundos físico e digital, com uma forte ênfase na automação e partilha livre de dados, tal como na otimização de todos os processos, desde o design de um produto até à sua distribuição e venda. Estes conceitos, apesar de relativamente bem difundidos, ainda se encontram nos inícios da sua implementação, apresentando dificuldades particulares para empresas de menor tamanho, visto a grande variedade de áreas e conhecimentos necessários à sua correta e completa implementação. Quanto ao equipamento em questão, apesar de não ter sido possível uma definitiva implementação das soluções projetadas, pode-se concluir que, utilizando vários equipamentos de vários fabricantes, é possível acrescentar capacidades de controlo e monitorização em linha com a Indústria 4.0, não sendo necessário o completo abate e substituição do equipamento. As soluções de controlo obtidas, apesar de não apresentarem um comportamento perfeito, têm a capacidade de elevar a utilidade da prensa e expandir as suas capacidades, sendo que estas foram atingidas sem a intervenção de fabricantes e com um mínimo de elementos proprietários, sendo o *retrofit* uma boa solução para o aproveitamento de equipamentos que estejam a ficar obsoletos.

Retrofitting of a Hydraulic Press for Compliance with the Concepts of Industry 4.0

Abstract

The purpose of this thesis work was to adapt, through the process of retrofitting, a hydraulic press equipped with heated plates so that it would comply with the concepts of Industry 4.0. This particular press is part of a wider range of equipment belonging to the Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC) do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). The goal of this project is to have the press ready for insertion into a new network of machines being developed in parallel, connecting all the different work units of INEGI.

In order to reach said goal, it was first conducted a research on the topic of “Industry 4.0”, to better understand the core concepts, ideas and technologies that are involved in its implementation. Then, the hydraulic press was described, and its main characteristics summarized, being, at the same time, identified the failings of its control as well as its incompatibilities with the concepts of Industry 4.0. In this way, it was possible to define the particular points where improvement was needed and, thus, the particular objectives of this thesis. With this done, the press was subdivided into sections and the improvements planned for each section were detailed as well as the equipment needed to conduct said improvements. In its final form, the different subsystems of the press will be connected to a control and monitoring system composed by a PLC and an HMI, being this also the bridge to the aforementioned machine network. The desired behaviour of the press was planned, and the PLC programmed as well as the graphic interface created. In addition to this, the electrical diagrams for new systems were drawn. Finally, using the self-tuning capabilities of the PLC, control parameters for the control of the applied force were reached and tested, while the temperature control was achieved using the integrated controller of the thermoregulator and the control of the lower plate position was done by programming an on/off controller with setpoint adjustment in the PLC.

In this manner, several conclusions were reached. First, is that 4th Industrial Revolution that is “Industry 4.0” is heavily based on the connectivity between the digital and physical worlds, with a strong dependency on automation technologies and the free and widespread gathering and sharing of valuable data, optimizing every layer of the production process, from the design stage of products to its logistics and sale. While starting to be accepted by a vast number of companies and industries, these concepts are still in the initial stages of implementation, presenting several key difficulties to small and medium enterprises, mostly due to the different areas of knowledge needed for the full and successful implementation of these concepts. As for the hydraulic press in which this work is centred, despite not being able to fully complete the retrofitting process, it was possible to conclude that, using different equipment from different manufacturers, it is possible to add control, monitoring and communication capabilities that are in line with the concepts of Industry 4.0. It is thus possible to extend the lifetime of an equipment that would otherwise be at the end of its life cycle. The control solutions reached, although not perfect, have the potential to elevate the hydraulic press and improve its use, having these solutions been reached with minimal use of proprietary hardware and software, proving that the retrofitting process is a viable way of implement the concepts of Industry 4.0 to older equipment.

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer aos coorientadores do INEGI, Eng. Fernando Silva e Dr. Luís Pina, tal como aos restantes elementos da UMEC, pela sua ajuda e orientação, sempre disponíveis quando necessário e sempre dispostos a fornecer conselhos quanto à direção e evolução da dissertação.

Gostaria também de agradecer ao Professor Fernando Gomes de Almeida, orientador da FEUP, pelas revisões e correções realizadas durante o progresso do trabalho.

Finalmente gostaria de agradecer aos meus pais e amigos, por me terem apoiado durante todo o percurso que levou à realização desta dissertação.

Índice de Conteúdos

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos.....	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2 Objetivos do projeto	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Indústria 4.0 e o Conceito de <i>Retrofitting</i>	5
2.1 Enquadramento Histórico.....	5
2.2 Conceitos Relevantes	6
2.3 Vantagens e Desafios	14
2.3.1 Vantagens.....	14
2.3.2 Desafios.....	15
2.4 Projetos e Incentivos à Indústria 4.0	16
2.5 Retrofitting e a sua relação com a Indústria 4.0	19
2.5.1 Retrofitting	19
2.5.2 Retrofitting Dedicado à Indústria 4.0.....	21
3 Prensa Hidráulica SATIM	23
3.1 Equipamentos Disponíveis no Mercado	23
3.2 Descrição da Prensa SATIM P.M.L. I.....	28
3.2.1 Características Técnicas Gerais	28
3.2.2 Sistemas de Controlo.....	30
3.2.3 Insuficiências do Equipamento Original	37
3.3 Retrofitting da Prensa.....	42
3.3.1 Requisitos Técnicos.....	42
3.3.2 Arquitetura de Controlo a Implementar	43
4 Subsistemas da Prensa Hidráulica	45
4.1 Sistema de Controlo de Temperatura	45
4.1.1 Descrição de Funcionamento	45
4.1.2 Equipamentos e Componentes integrados	47
4.1.3 Projeto Hidráulico	52
4.1.4 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema	54
4.2 Sistema de Controlo da Força.....	55
4.2.1 Descrição do Funcionamento	55
4.2.2 Equipamentos e Componentes integrados	55
4.2.3 Projeto Mecânico	57
4.2.4 Variáveis de Entrada e Saída do Subsistema.....	59
4.3 Sistema de Controlo de Deslocamento do Prato Inferior	60
4.3.1 Descrição do Funcionamento	60
4.3.2 Equipamentos e Componentes Integrados.....	60
4.3.3 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema	61
4.4 Sistema de Segurança.....	62
4.4.1 Descrição de Funcionamento	62
4.4.2 Equipamentos e Componentes Integrados.....	64
4.4.3 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema	66
4.5 Painel de Controlo.....	68
4.5.1 Descrição de Funcionamento	68
4.5.2 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema	70
5 Sistema de Supervisão e Controlo.....	71

5.1	Equipamentos e Componentes integrados.....	71
5.2	Controlo da Prensa.....	77
5.2.1	Parametrização.....	77
5.2.2	Comportamento do Sistema	81
5.2.3	Controladores de Processo.....	90
5.3	HMI – Interface Homem-Máquina.....	91
5.3.1	Dados partilhados com o PLC.....	91
5.3.2	Dashboard	93
5.4	Ligação OPC-UA.....	103
5.4.1	Revisão Bibliográfica.....	103
5.4.2	Funcionalidades Remotas e Integração com a Rede.....	103
6	Projeto Elétrico	105
6.1	Cálculo das Potências	105
6.1.1	Principais Componentes Consumidores	105
6.1.2	Elementos Menores de Consumos	108
6.1.3	Distribuição dos Consumos pelas fases	110
6.2	Organização do Quadro de Manobra	112
7	Validação dos Controladores de Processo	115
7.1	Controlador de Força.....	115
7.1.1	Setup e Estimação dos Parâmetros de Controlo	115
7.1.2	Resposta ao Degrau	118
7.1.3	Resposta à Rampa	120
7.2	Controlador de Temperatura	124
7.2.1	Setup e Estimação dos Parâmetros de Controlo	124
7.2.2	Resposta ao Degrau	125
7.2.3	Resposta à Rampa	127
7.3	Controlador de Posição.....	129
7.3.1	Setup e Estratégia de Controlo	129
7.3.2	Resultados	130
8	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	135
	Referências.....	137
	ANEXO A: Desenhos Técnicos dos Suportes das Células de Carga.....	141
	ANEXO B: Esquemas Elétricos	147

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquematização da rede de máquinas da UMEC	2
Figura 2 – Evolução das Revoluções Industriais (Santos et al. 2018).....	6
Figura 3 – Tecnologias Integrais à Indústria 4.0 (Melanson 2018).....	7
Figura 4 – Conjunto de Tecnologias Envolvida na Criação da IoT (Atzori et al. 2010)	8
Figura 5 – Os três V's que caracterizam o conceito de <i>Big Data</i> (Sagiroglu e Sinanc 2013).....	10
Figura 6 – Gráfico da evolução da adoção de robôs por mil trabalhadores (Cséfalvay 2019).....	13
Figura 7 – Esquema de uma Linha de Montagem Tradicional (Koren et al. 2017)	14
Figura 8 – Esquematização de uma linha de montagem flexível (Koren, Gu e Guo 2017)	15
Figura 9 – Iniciativas tomadas por estados membros da União Europeia com o propósito de incentivar a adoção da indústria 4.0 até 2016 (Takakuwa et al. 2018)	18
Figura 10 – Incentivos e programas dedicados à Indústria 4.0 no continente asiático (Takakuwa, Veza e Celar 2018).....	19
Figura 11 – Exemplo do <i>retrofit</i> de uma estrutura metálica para conferir propriedades anti sísmicas a um edifício (Zohrevand 2020).	20
Figura 12 – Antes e depois de um <i>retrofit</i> à proa de um navio. (Yanagida 2018)	20
Figura 13 – Prensa Laboratorial da <i>gibitre Instruments</i> (<i>gibitre 2020</i>).....	24
Figura 14 – Prensa Laboratorial da <i>Carver, Inc</i> (<i>Carver 2020</i>).....	26
Figura 15 – Vista frontal da Prensa P.L.M. I	28
Figura 16 – Diagrama do Funcionamento da Prensa	30
Figura 17 – Painel de Controlo Atual	31
Figura 18 – Detalhe do painel de controlo original.....	32
Figura 19 – Esquema original do sistema hidráulico de alta pressão.....	33
Figura 20 – Esquema hidráulico do sistema de arrefecimento	37
Figura 21 – Comparação entre o valor lido por uma célula de carga e o sensor de pressão original .	38
Figura 22 – Detalhe da zona de comparação entre a célula de carga e o transdutor	39
Figura 23 – Taxa de arrefecimento dos pratos a ar e a água	40
Figura 24 – Taxa de Aquecimento dos pratos	40
Figura 25 – Distribuição de temperatura no prato inferior	41
Figura 26 – Relação hierárquica entre os diferentes sistemas de controlo	43
Figura 27 – Modelo do sistema mais complexo de controlo de temperatura	45
Figura 28 – Modelo do sistema mais simples de controlo de temperatura	45
Figura 29 – Relação caudal-pressão da bomba integrada no termorregulador	49
Figura 30 – Variação da potência de arrefecimento com a temperatura do fluido térmico	49
Figura 31 – Painel de ligações ao controlador MP-888	50
Figura 32 – Localização dos termopares em cada prato	51
Figura 33 – Curvas características do conjunto bomba/motor das linhas de alimentação de fluido térmico	52
Figura 34 – Diagrama Hidráulico do sistema de controlo de temperatura direto	53

Figura 35 – Diagrama hidráulico para o sistema com controlo individual da temperatura de cada prato	53
Figura 36 – Diagrama representativo da interação entre o sistema de controlo e supervisão e o subsistema de controlo de temperatura.	54
Figura 37 – Diagrama de blocos representativo do sistema de controlo de pressão	55
Figura 38 – Diagrama de blocos representativo do novo sistema de controlo de força	55
Figura 39 – Modelo 3D das células de carga e a sua fixação aos pratos. A imagem da direita mostra o conjunto com a proteção do material de isolamento transparente para melhor visualização do conjunto.	58
Figura 40 – Componentes de fixação das células de carga aos pratos. Da esquerda para a direita: base de fixação da célula; base de fixação da cabeça da célula; suporte para o arrefecimento das células; proteção do material de isolamento.	58
Figura 41 – Diagrama descritivo da interação entre o subsistema de controlo de força e o sistema de supervisão e controlo.....	59
Figura 42 – Diagrama a exemplificar o funcionamento do sistema de controlo de deslocamento	60
Figura 43 – Transdutor potenciométrico linear MPT500 (esquerda) e conversor DC-DC WAGO 787-2802 (direita).....	60
Figura 44 – Diagrama descritivo da interação entre o subsistema de controlo de posição e o sistema de supervisão e controlo.....	61
Figura 45 – Esquematização da localização das barreiras físicas	62
Figura 46 – Modelo em SolidWorks da proteção do cilindro	63
Figura 47 – Sinal de aviso contra superfícies quentes.....	64
Figura 48 – Diagrama a exemplificar o funcionamento do sistema de segurança	64
Figura 49 – Diagrama descritivo da interação do subsistema de segurança com o sistema de supervisão e controlo	67
Figura 50 – Modelo do novo painel de controlo	68
Figura 51 – Diagrama descritivo da interação do painel de controlo com o sistema de supervisão e controlo	70
Figura 52 – SIMATIC HMI KTP1200 Basic	72
Figura 53 – PLC S7-1200 CPU	73
Figura 54 – Módulos de expansão para o PLC	74
Figura 55 – Fonte SITOP PSU 100L	76
Figura 56 – Representação do PLC S7-1200	77
Figura 57 – Representação dos módulos de leitura de termopares	79
Figura 58 – Representação dos módulos de entradas e saídas analógicas	80
Figura 59 – Modos principais do comportamento da prensa	81
Figura 60 – Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo <i>standby</i>	82
Figura 61– Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo de operação automático	84
Figura 62 – Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo de operação manual	86
Figura 63 – Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo de emergência	88
Figura 64 – Esquema do controlador de força	90
Figura 65 – Esquema do controlador de temperatura.....	90
Figura 66 – Ecrã de login.....	93
Figura 67 – Ecrã de modo de operação manual do sistema simples	94

Figura 68 – Ecrã de modo de operação manual do sistema com controlo individual da temperatura de cada prato.....	94
Figura 69 – Ecrã de detalhe do sistema de controlo de força	95
Figura 70 – Ecrã de detalhe do sistema de controlo de temperatura do sistema mais simples	95
Figura 71 – Ecrã de detalhe do sistema de controlo de temperatura do sistema com controlo individual da temperatura de cada prato.....	96
Figura 72 – Ecrã de modo de operação automático do sistema mais simples	96
Figura 73 – Ecrã de modo de operação automático do sistema com controlo individual da temperatura de cada prato.....	97
Figura 74 – Ecrã de inserção ou seleção de ciclos.....	98
Figura 75 – Ecrã de visualização da evolução dos ciclos.....	98
Figura 76 – Ecrã de opções	99
Figura 77 – Ecrã de administração de utilizadores	100
Figura 78 – Ecrã de visualização do histórico de alarmes.....	100
Figura 79 – Ecrãs de visualização do estado das entradas e saídas do PLC.....	101
Figura 80 – Ecrãs de visualização do estado das entradas e saídas dos módulos de leitura de termopares	101
Figura 81 – Ecrãs de visualização do estado das entradas e saídas dos módulos de entradas e saídas analógicas	102
Figura 82 – Ecrã de <i>setup</i> de limites para os parâmetros dos processos.....	102
Figura 83 – Terminais das bobinas do motor do conjunto hidráulico de alta pressão.....	105
Figura 84 – Placa com as características do motor do conjunto hidráulico de alta pressão	106
Figura 85 – Placa do termorregulador TT-390 Z.....	107
Figura 86 – Placa com as características do motor das bombas de linha	108
Figura 87 – <i>hawa</i> POWER SUPPLY 0806-2404-00-10.....	109
Figura 88 – Transformador <i>legrand</i> Transformateur Machine-Outil 42674	109
Figura 89 – Controlador JUMO GmbH & Co. KG 7020318-2100-23.....	110
Figura 90 – Quadro de manobra original	112
Figura 91 – Esquema da organização do novo quadro de manobra.....	113
Figura 92 – Diagrama representativo do controlador PID usado pelo PLC (SIEMENS 2019)	116
Figura 93 – Resposta do sistema a um degrau de 30000N	118
Figura 94 – Resposta do sistema a um degrau de 55000N	118
Figura 95 – Resposta do sistema a um degrau de 80000N	119
Figura 96 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e patamar de 50000N	120
Figura 97 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e patamar de 75000N	120
Figura 98 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e patamar de 100000N	121
Figura 99 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 2000N/s e patamar de 50000N (esquerda) e patamar de 75000N (direita)	122
Figura 100 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 2000N/s e patamar de 100000N	122

Figura 101 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e vários patamares.....	123
Figura 102 – Resposta do sistema a um degrau de 100°C	125
Figura 103 – Resposta do sistema a um degrau de 175°C	125
Figura 104 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 2°C/min.....	127
Figura 105 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 4°C/min.....	127
Figura 106 – Esquema do posicionamento do prato inferior durante os testes de validação	129
Figura 107 – Gráfico do movimento total do prato	130
Figura 108 – Testes de controlo de posição realizados.....	130
Figura 109 – Testes de controlo de posição com ajuste de <i>setpoint</i>	132
Figura 110 – Representação dos Erros Absolutos de cada Iteração.....	133
Figura 111 – Teste de controlo de posição após 5 iterações com o cálculo dos coeficientes de ajuste	134

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Diferentes tipos de serviços de <i>cloud computing</i> (Alcacer e Cruz-Machado 2019)	9
Tabela 2 – Evolução do Uso de Simulações adaptado de (Rodič 2017)	10
Tabela 3 – Diferentes Métodos de Fabricação Aditiva; adaptado de (Alcacer e Cruz-Machado 2019).....	12
Tabela 4 – Alguns projetos financiados pela UE concentrados no conceito de <i>retrofitting</i> , adaptado de (Ehrlich et al. 2015)	21
Tabela 5 – Processo de <i>retrofit</i> dedicado à indústria 4.0, adaptado de Lins e Oliveira (2020)	22
Tabela 6 – Características da Prensa fornecida pela <i>gibitre Instruments</i> , adaptada de (gibitre 2020).....	25
Tabela 7 – Dimensões da Prensa fornecida pela <i>gibitre Instruments</i> adaptada de (gibitre 2020).....	25
Tabela 8 – Características da Prensa Laboratorial Disponibilizada pela <i>Carver, Inc</i> , adaptada de (Carver 2020)	26
Tabela 9 – Dimensões da Prensa Laboratorial Disponibilizada pela <i>Carver, Inc</i> , adaptada de (Carver 2020)	27
Tabela 10 – Características da Prensa SATIM P.M.L. I	29
Tabela 11 – Dimensões da Prensa SATIM P.M.L. I	29
Tabela 12 – Descrição das funcionalidades dos controladores principais do painel de controlo.....	31
Tabela 13 – Funções do painel de controlo	32
Tabela 14 – Composição do sistema hidráulico de alta pressão.....	34
Tabela 15 – Composição do sistema de aquecimento	35
Tabela 16 – Composição do sistema de arrefecimento.....	36
Tabela 17 – Temperaturas medidas na avaliação do prato inferior.....	41
Tabela 18 – Equipamentos adquiridos para o sistema de controlo de temperatura	47
Tabela 19 – Características técnicas do termorregulador TT-390 Z	48
Tabela 20 – Descrição do painel de ligações ao controlador MP-888.....	50
Tabela 21 – Características das bombas das linhas de alimentação de fluído térmico	51
Tabela 22 – Características dos motores das bombas das linhas de alimentação de fluído térmico ..	52
Tabela 23 – Descrição dos dados trocados pelo subsistema de controlo de temperatura	54
Tabela 24 – Equipamentos adquiridos para o sistema de controlo de pressão/força	56
Tabela 25 – Características técnicas das células de carga CPA-25-D, dos respetivos módulos de acondicionamento de sinal SGA e outros equipamentos	56
Tabela 26 – Continuação da Tabela 25	57
Tabela 27 – Legenda da Figura 39	58
Tabela 28 – Legenda dos dados trocados entre o subsistema de controlo de força e o sistema de supervisão e controlo	59
Tabela 29 – Características técnicas do transdutor de posição potenciométrico.....	61
Tabela 30 – Legenda dos dados trocados entre o subsistema de controlo de posição e o sistema de supervisão e controlo	61
Tabela 31 – Equipamentos adquiridos para o sistema de segurança	65
Tabela 32 – Características técnicas dos principais componentes do sistema de segurança.....	66
Tabela 33 – Legenda dos dados trocados entre o subsistema de segurança e o sistema de supervisão e controlo.....	67

Tabela 34 – Funções do painel de controlo	69
Tabela 35 – Legenda dos dados trocados entre o painel de controlo e o sistema de supervisão e controlo	70
Tabela 36 – Equipamentos adquiridos para o sistema de controlo e supervisão	71
Tabela 37 – Características principais da HMI KTP1200 Basic	72
Tabela 38 – Características principais do PLC S7-1200	73
Tabela 39 – Características principais dos módulos dos módulos de expansão adquiridos	75
Tabela 40 – Características principais da fonte SITOP PSU 100L	76
Tabela 41 – Entradas digitais	78
Tabela 42 – Entradas analógicas	78
Tabela 43 – Saídas digitais	78
Tabela 44 – Correspondência entre as entradas do primeiro módulo de 8 entradas com os respetivos termopares	79
Tabela 45 – Correspondência entre as entradas do segundo módulo de 8 entradas com os respetivos termopares	80
Tabela 46 – Correspondência entre as entradas do módulo de 4 entradas com os respetivos termopares	80
Tabela 47 – Entradas analógicas	81
Tabela 48 – Saídas analógicas	81
Tabela 49 – Descrição dos estados do modo de standby	83
Tabela 50 – Descrição das transições do modo de standby	83
Tabela 51 – Descrição dos estados do modo de operação automático	85
Tabela 52 – Descrição das transições do modo de operação automático	85
Tabela 53 – Descrição dos estados do modo de operação manual	87
Tabela 54 – Descrição das transições do modo de operação manual	87
Tabela 55 – Descrição dos estados do modo emergência	89
Tabela 56 – Descrição das transições do modo de emergência	89
Tabela 57 – Variáveis de comando trocadas entre a HMI e o PLC	92
Tabela 58 – Dados sobre o estado da prensa partilhados para a rede interna da UME	103
Tabela 59 – Dados para a gravação remota de ciclos	104
Tabela 60 – Consumos de corrente por fase do sistema mais simples	110
Tabela 61 – Consumos de corrente do sistema mais complexo possível, com as bombas de linha e resistências de aquecimento	111
Tabela 62 – Legenda dos componentes no novo quadro de manobra	114
Tabela 63 – Parâmetros do controlador PID de força	116
Tabela 64 – Parâmetros dos testes realizados para avaliar a qualidade do controlador de força	117
Tabela 65 – Tempos de atraso, taxas de variação e erros absolutos médios das respostas ao degrau do sistema	119
Tabela 66 – Erro absoluto médio após 10s para as solicitações em rampa de 1000N/s	121
Tabela 67 – Erro absoluto médio após a interseção com a linha de referência para a solicitação em rampa de 2000N/s e patamar de 75000 e 100000N	122
Tabela 68 – Parâmetros dos testes realizados para avaliar o controlo de temperatura através do termorregulador	124

Tabela 69 – Taxas médias de aquecimento e arrefecimento na resposta ao degrau	126
Tabela 70 – <i>Overshoot</i> e <i>Undershoot</i> nas respostas ao degrau	126
Tabela 71 – Erro Absoluto Médio no seguimento das rampas de aquecimento e arrefecimento	128
Tabela 72 – Velocidades médias e tempos de transladação do prato	130
Tabela 73 – Posições alcançadas e erros obtidos nos testes de posição	131
Tabela 74 – Média das posições alcançadas nos testes e coeficientes de erro daí retirados	131
Tabela 75 – Posições alcançadas e erros obtidos nos testes de posição nos testes com coeficiente de erro fixo.....	132
Tabela 76 – Posições alcançadas e erros obtidos nos testes de posição com coeficiente de erro iterativo	133

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Como é considerado por muitos, estamos no início de uma nova revolução industrial focada na digitalização dos sistemas de produção e organização, sendo o novo normal o funcionamento de equipamentos industriais dependentes da intercomunicação, capacidade de computação e de decisão inteligente local. Esta nova revolução e os conceitos associados, introduzem as condições necessárias para impulsionar a indústria Europeia e mundial, a um nível superior de otimização e capacidade de produção (Lins et al. 2018).

Com o intuito de se manter tecnologicamente modernizado e de se destacar dentro da indústria portuguesa como líder e parceiro preferencial no processo de modernização, o Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) arrancou diversos projetos com o objetivo de ganhar competências nas áreas fundamentais à aplicação dos conceitos da Indústria 4.0. Entre os quais destacam-se: as redes de comunicação industriais, processamento de sinais, simulação de processos, tratamento de *Big Data*¹, os *Digital Twins*², *Edge Computing*³ e a manutenção preditiva.

Um desses projetos foca-se, então, na modernização de diversos equipamentos laboratoriais em uso pela Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC) do INEGI, tal como, a criação de uma rede máquinas de comunicação, que será expandida a todas as unidades e seus respetivos laboratórios. A modernização planeada visa a adição de sistemas de monitorização, controlo e comunicação aos diversos equipamentos, de maneira a estarem em conformidade com os conceitos da Indústria 4.0.

Tal como esquematizado na Figura 1, a rede da UMEC é composta por 7 equipamentos que serão conectados a um servidor interno. Este servidor fará a ligação ao ponto comum das outras unidades, criando assim uma rede de máquinas que englobará todo o INEGI.

¹ *Big Data*: conceito que lida com o tratamento de grandes quantidades de dados.

² *Digital Twins*: método de monitorização de um processo onde é gerado virtualmente uma cópia deste.

³ *Edge Computing*: paradigma definido pela descentralização do armazenamento e processamento de dados.

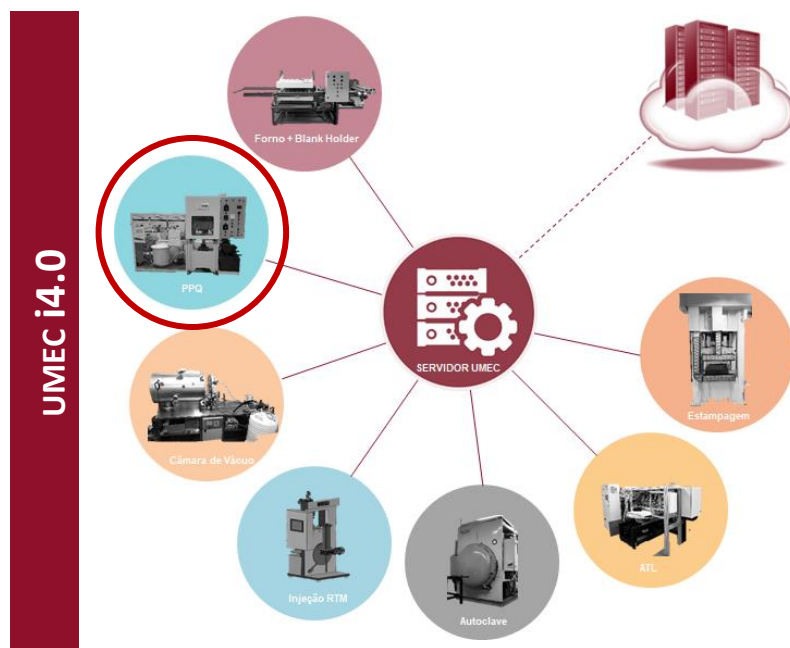


Figura 1 – Esquemática da rede de máquinas da UMEC

Esta dissertação insere-se no projeto mencionado e visa a modernização de um desses equipamentos, nomeadamente, uma prensa hidráulica com pratos aquecidos, rodeada por um círculo na Figura 1, usada no fabrico de placas compósitas. A título de curiosidade, estas são obtidas por consolidação ou cura de pré impregnados, cujas propriedades mecânicas dependem consideravelmente dos ciclos de temperatura e pressão aplicados no decorrer do processo de fabrico.

Para o efeito, será realizado um *retrofit* aos sistemas de controlo e monitorização da prensa hidráulica, de maneira a não só permitir que esta se ligue à rede UMEC, mas também otimizar o seu funcionamento e aumentar a qualidade do trabalho realizado.

1.2 Objetivos do projeto

Os objetivos desta Dissertação são, então, a aplicação dos conhecimentos obtidos no decurso do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, de forma a obter um equipamento que se conforme aos conceitos da Indústria 4.0.

Assim, a prensa hidráulica com pratos aquecidos será transformada num sistema ciberfísico, capaz de monitorizar o campo de pressões nos pratos e de controlar finamente a distribuição de temperatura a que as placas de compósito estão sujeitas.

Esta transformação será realizada através das seguintes ações:

1. Sensorização dos subsistemas da prensa;
2. Instalação e programação de um sistema de controlo moderno, nomeadamente um controlador lógico programável (PLC);
3. Design e programação de uma nova interface homem-máquina (HMI);
4. Instalação e configuração de um novo sistema de aquecimento e arrefecimento;
5. Criação de esquemas elétricos que incluam os novos estados de funcionamento da máquina;
6. Projeto mecânico de novos componentes a incorporar;
7. Configuração da comunicação através da arquitetura OPC-UA.

Todo o equipamento necessário à conclusão destes objetivos, incluindo o respetivo PLC e o conjunto de sensores, foi anteriormente definido e adquirido pelo INEGI.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada do seguinte modo:

No capítulo 2 é feita uma breve revisão aos conceitos da Indústria 4.0, descrevendo o caminho das revoluções indústrias até ao presente, os seus conceitos essenciais e tecnologias integradas na sua realização e as potenciais vantagens e desafios na sua implementação, fazendo também uma referência a projetos e iniciativas destinadas a incentivar a adoção dos conceitos da Indústria 4.0 (I4.0). É apresentado o conceito de *retrofit*, exemplificando o seu uso em diferentes áreas tal como a sua aplicação relativa à indústria 4.0.

O capítulo 3 começa com uma revisão das capacidades de controlo implementadas em equipamentos atuais semelhantes, seguido de uma descrição da configuração original da prensa em análise. As insuficiências da prensa são então enumeradas e os pontos onde é necessária modernização são identificados. É também feita a descrição dos requisitos técnicos a alcançar com o processo de *retrofit* e mostrado o planeamento da nova arquitetura de controlo, sendo esta composta por um sistema de controlo e supervisão e diversos subsistemas.

No capítulo 4 é realizada a parametrização dos subsistemas criados pelo *retrofit*. São enumerados os novos equipamentos que irão fazer parte destes subsistemas e a sua interação com o sistema de supervisão e controlo é definida.

É no capítulo 5 que o sistema de supervisão e controlo é detalhada. Os seus componentes são definidos e é apresentada de forma esquemática o comportamento programado para a prensa, definindo os diversos modos de funcionamento que esta terá após o *retrofit*. É também neste capítulo que é apresentada, de forma sucinta, os métodos de controlo escolhidos para os diferentes parâmetros a ser controlados durante a operação da prensa. É realizada também a apresentação e explicação do funcionamento da HMI desenhada para o novo sistema, terminando com um resumo da ligação, através do protocolo OPC-UA, à rede da UMEC.

O capítulo 6 é focado no projeto elétrico do trabalho, são realizados os cálculos para os consumos de corrente dos equipamentos, tal como o seu equilíbrio pelas fases de alimentação. De seguida é apresentado um esquema representativo da organização do novo quadro de manobra, encontrando-se os esquemas elétricos no Anexo B.

No capítulo 7 são detalhados os métodos de teste para validar os elementos de controlo dos diferentes parâmetros, mostrando também os resultados destes.

Finalmente, no capítulo 8 são expostas as conclusões retiradas do processo de modernização e possíveis melhorias a realizar no futuro.

2 Indústria 4.0 e o Conceito de *Retrofitting*

2.1 Enquadramento Histórico

Indústria 4.0 é o nome que se dá à Quarta Revolução Industrial, estando esta ainda na sua fase inicial.

A Primeira Revolução Industrial começou no século XVIII, com a introdução das máquinas a vapor, fábricas de produção e métodos de fabricação mecanizados, afastando-se consideravelmente dos métodos tradicionais de produção manual. Esta primeira revolução levou a um aumento constante e sem precedentes dos números populacionais e na qualidade de vida dos cidadãos (Lele 2019).

A Segunda Revolução Industrial começou nos finais do século XIX, inícios do século XX e foi, por sua vez, demarcada pelo uso generalizado da energia elétrica e a introdução (ainda que limitada) de normas de fabricação e de produção em massa. Outro fator importante neste segundo salto na industrialização, foi o desenvolvimento e alargada adoção de sistemas de comunicação de longa distância, como o telégrafo (Lele 2019).

Finalmente, a Terceira Revolução Industrial, também conhecida como a Revolução Digital, foi o começo da Era da Informação. A introdução de microprocessadores e a generalização do uso da computação digital não só levaram a um melhoramento extraordinário no poder de processamento de informação, mas também permitiu que esta fosse partilhada de maneira muito mais dependente, sem medo de esta ser corrompida ou perdida. A invenção da Internet veio amplificar ainda mais os benefícios da computação digital em relação à partilha de informação, aumentando a distância e a rapidez a que esta se pode realizar. Na Figura 2 podemos ver, representado de maneira simples, a evolução das diferentes revoluções industriais (Lele 2019).

Presentemente, encontramos-nos no início da Quarta Revolução Industrial, sendo que o termo “Indústria 4.0” teve a sua origem na Alemanha, no ano de 2011, introduzido na “Hannover Fair” como uma estratégia nacional para fortalecer a competitividade da indústria alemã. Esta estratégia tornou-se a base da ideia do que seria o próximo passo tecnológico, tendo o termo sido adotado pelo mundo, pouco tempo depois da sua introdução, e os conceitos associados reconhecidos como o futuro da indústria (Lele 2019).

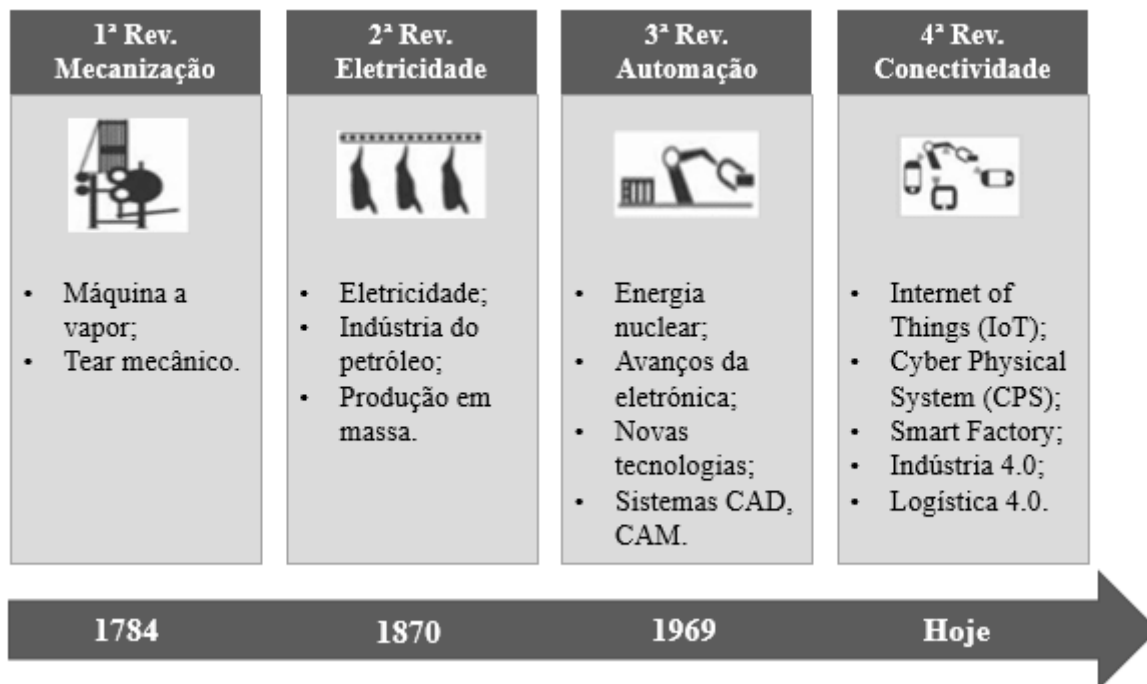


Figura 2 – Evolução das Revoluções Industriais (Santos et al. 2018)

2.2 Conceitos Relevantes

A agora considerada Quarta Revolução Industrial, pode ser caracterizada pelo aumento do uso de sistemas ciberfísicos (Cyber-Physical Systems – CPS), combinado com a adoção de tecnologias de informação e comunicação (Information and Communication Technology – ICT), de maneira a criar uma rede de comunicação entre máquinas capazes de um elevado nível de automação e processamento de dados. Um sistema moderno, completamente de acordo com os conceitos da Indústria 4.0, focará os seus recursos humanos em tarefas relacionadas com o desenvolvimento e a inovação, deixando outros aspetos do negócio, como a distribuição, organização da, ou mesmo a própria, produção, para sistemas de máquinas inteligentes, automatizadas e modulares. (Fonseca 2018).

Em Oztemel e Gursev (2018), é proposta uma definição concisa da Indústria 4.0:

“Industry 4.0 is a manufacturing philosophy that includes modern automation systems with cretin level autonomy, flexible and effective data exchanges encoring the implementation of next generation production technologies, innovation and design, and more personal and more agile in production as well as customized products.”

Hermann et al. (2016), após a realização de um estudo na matéria, definiram 4 princípios como sendo os pilares da Indústria 4.0, nomeadamente:

- **Interconexão:** objetos, máquinas, sensores e humanos encontram-se todos ligados através de redes de comunicação, permitindo a colaboração entre diferentes elementos na realização de um objetivo comum.
- **Transparência de informação:** referente ao aumento na quantidade e variedade de sensores, permitindo a criação de cópias virtuais de sistemas reais. Esta informação pode ser então usada para avaliar o estado de equipamentos e processos e, daí, derivar conclusões que são de seguida disseminadas por toda a rede, facilmente acessíveis.

- **Poder de decisão descentralizado:** sendo possível através dos anteriores princípios, esta capacidade permite utilizar dados, reunidos no local ou partilhados na rede, para influenciar decisões; sendo estas, dentro de certas condições, feitas em tempo real sem intervenção humana. É um fator decisivo na automatização das tarefas de CPS.
- **Assistência Técnica:** passando a componente humana para um posto de supervisão de sistemas automáticos complexos, a Indústria 4.0 necessita de fornecer interfaces de controlo práticas. Quer isto dizer que o sistema tem de conseguir organizar e apresentar informação relevante de maneira compreensiva, facilmente usada para resolver eventuais problemas que, devido a fatores de complexidade ou segurança, necessitem de intervenção humana.

Em suma, a Indústria 4.0 é uma visão que prima pela ligação dos mundos físico e digital, revolucionando a interação entre eles. Esta revolução, não se baseando somente em conceitos abstratos, tem tecnologias consideradas como essenciais para a sua realização. Alcacer e Cruz-Machado (2019) agregaram as conclusões de vários autores e definiram 9 destas tecnologias, ou conjuntos de tecnologias e conceitos, consideradas essenciais para a implementação da Indústria 4.0. Estas estão representadas na Figura 3, sendo resumidas no seguimento do capítulo

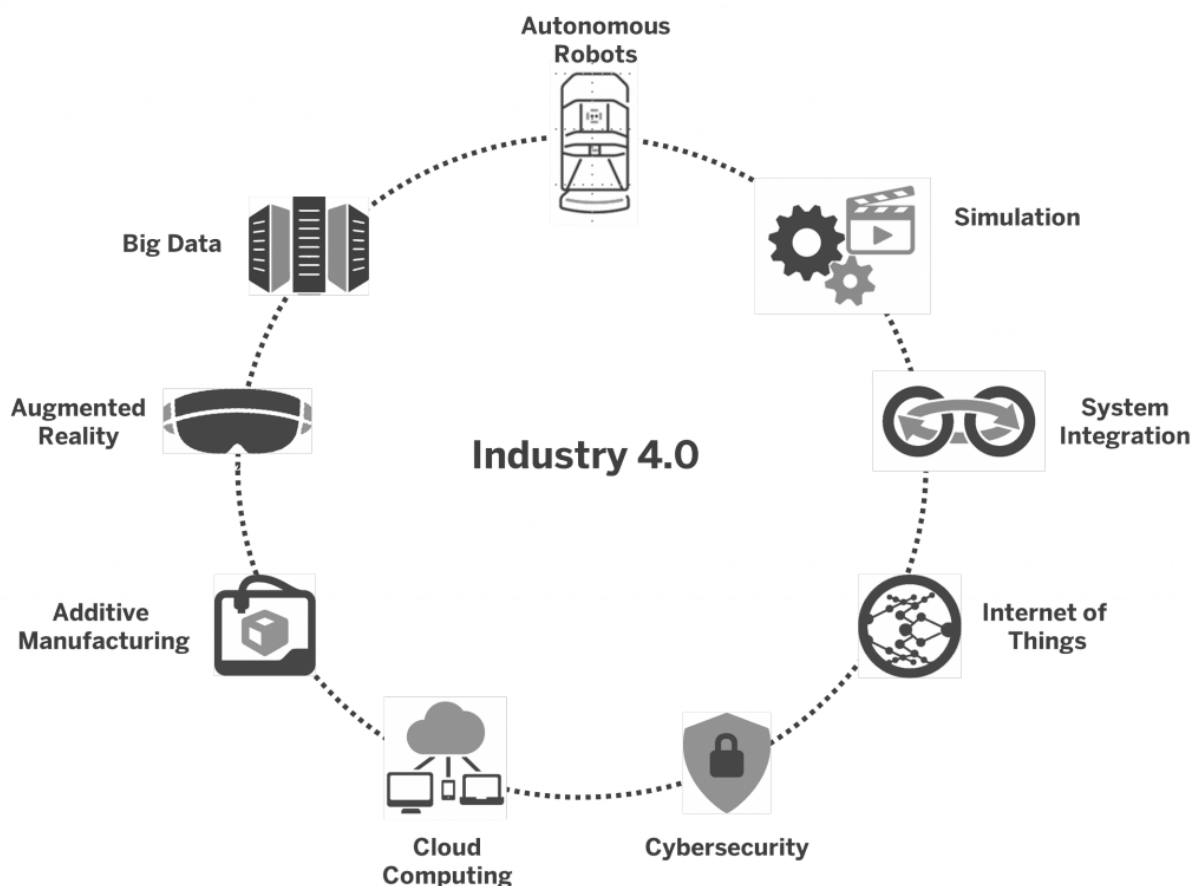


Figura 3 – Tecnologias Integradas à Indústria 4.0 (Melanson 2018)

Internet of Things

Em primeiro lugar temos a *Internet of Things* (IoT). IoT é um termo que engloba diversas tecnologias que, juntas, permitem a partilha de informação recolhida através de “coisas”. É definida como uma rede dinâmica e global, capaz de autorregulação e baseada em protocolos de comunicação. As “coisas” podem ser objetos, pessoas reais ou processos virtuais (como simulações), tendo estes elementos sempre uma identificação clara e única no espaço virtual. As tecnologias principais envolvidas na IoT estão representadas na Figura 4 (Li et al. 2014).

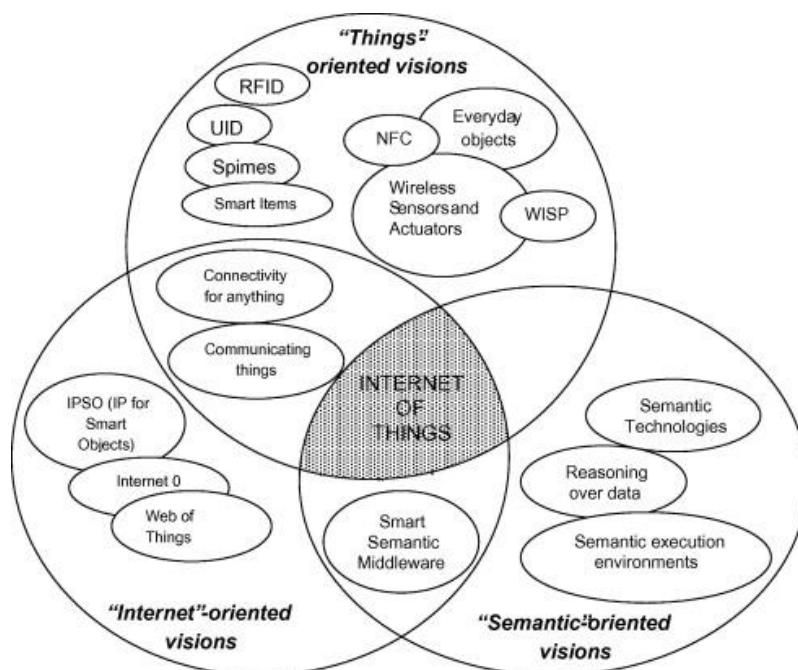


Figura 4 – Conjunto de Tecnologias Envolvida na Criação da IoT (Atzori et al. 2010)

Cloud Computing

Cloud Computing, é uma alternativa à posse de infraestruturas de IT (tecnologias de informação) complexas e dispendiosas. Trata-se de uma solução flexível, onde o poder computacional é dividido por vários centros, sendo usado como um serviço à medida das necessidades. O Instituto Nacional de Standards e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology* – NST) definiu *cloud computing* como sendo um modelo para facilitar o acesso conveniente, geral e por serviço, a um reservatório de recursos computacionais, facilmente adquiridos e dispensados com o mínimo de esforço por parte do utilizador. Este tipo de tecnologia, independente do dispositivo usado para aceder à *cloud*, faz parte da descentralização inerente à Indústria 4.0. A Tabela 1 mostra os três possíveis modelos de organização de um serviço de *Cloud Computing* (Jula et al. 2014).

Tabela 1 – Diferentes tipos de serviços de *cloud computing* (Alcacer e Cruz-Machado 2019)

Modelo	Descrição
<i>Infrastructure as a Service (IaaS)</i>	Neste tipo de serviço, o utilizador “compra” somente recursos computacionais, quer estes sejam armazenamento ou processamento, utilizando software à sua escolha.
<i>Platform as a Service (PaaS)</i>	Aqui o serviço que é disponibilizado não se trata de recursos computacionais, mas sim plataformas de desenvolvimento onde é possível desenvolver e correr aplicações inteiramente na <i>cloud</i> .
<i>Software as a Service (SaaS)</i>	O <i>SaaS</i> fornece acesso a aplicações específicas, independentes do dispositivo usado para aceder ao serviço, permitindo correr várias aplicações a partir de qualquer dispositivo.

Big Data

Em vez de uma tecnologia em específico ou conjunto de tecnologias, *Big Data* é uma consequência da implementação da *IoT* que agrega grandes quantidades de informação recolhidas por todo o tipo de origens. Como explicado por Oussous et al. (2018), *Big Data* pode ser definida, então, como a recolha, armazenamento e análise de uma enorme quantidade de dados, sendo estes de natureza extremamente variada. Difere de os métodos tradicionais de tratamento de dados pelo facto das ferramentas usadas não serem suficientemente poderosas, necessitando de novos e mais poderosos métodos de tratamento de dados. É geralmente considerado que *Big Data* é caracterizada principalmente por três características, denominadas 3 V's, (estando resumidos na Figura 5):

- **Volume:** devido ao aumento de dispositivos conectados à internet, e contínua expansão desta, a quantidade de dados aumentou exponencialmente, exigindo uma estrutura de comunicação e armazenamento mais robusta.
- **Velocidade:** não só houve um aumento na quantidade de dados produzidos, como também a velocidade da sua geração aumentou. Deste modo, é inevitável o crescente aumento no poder de processamento, de maneira a ser possível a análise de dados em tempo útil.
- **Variedade:** no seguimento dos dois primeiros V's, houve também um aumento exponencial no tipo de dados que são gerados e transmitidos pela *IoT*. Estes dados são criados e partilhados por diversos tipos de equipamentos, contendo diversos tipos de formatos. Não havendo limite na caracterização da informação, os dados processados podem ser estruturados ou não, públicos ou privados, em tempo real ou em lote, locais ou não, intactos ou corrompidos, tendo o sistema que ser capaz de lidar com todos estes fatores.

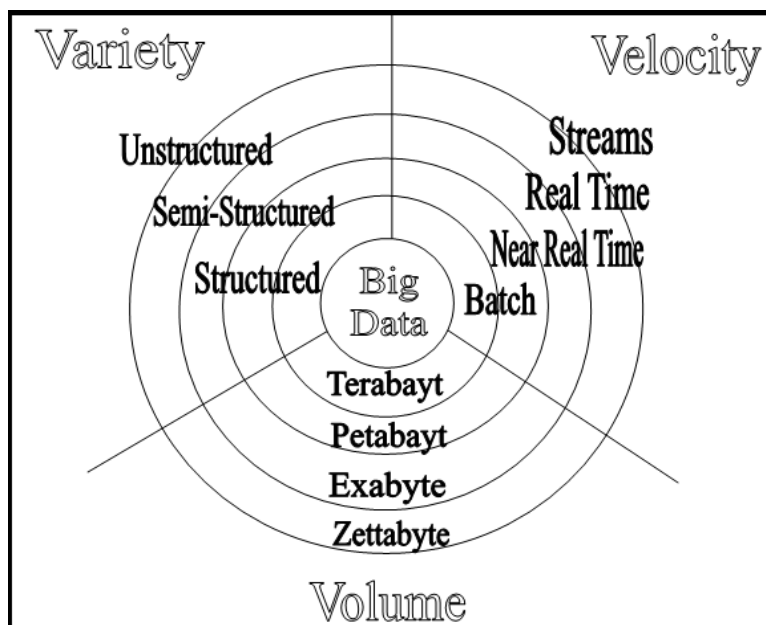


Figura 5 – Os três V's que caracterizam o conceito de *Big Data* (Sagiroglu e Sinanc 2013)

Assim, *Big Data* não existe sem a *IoT*, que é o caminho por onde os dados são reunidos, e é impulsionada pela *Cloud Computing*, que permite o acesso fácil e flexível aos recursos necessários para o armazenamento e tratamento desses mesmos dados.

Simulações em Ambiente Virtual

A simulação de sistemas e processos reais em ambiente virtual é um dos aspetos chave no apoio à Indústria 4.0, pois visa alcançar os seus objetivos de otimização dos processos. A criação de modelos detalhados, quer de sistemas de produção, sistemas logísticos ou de negócio, permite criar uma forte base para a sua compreensão do mundo real, através da comparação de resultados entre si. A *IoT*, *Big Data* e *Cloud Computing* foram decisivos na evolução, mostrada na Tabela 2, do uso de simulações virtuais (Zuniga et al. 2017).

Tabela 2 – Evolução do Uso de Simulações adaptado de (Rodič 2017)

Tipo de Aplicação	Descrição
Aplicações Individuais [1960+]	Simulações limitadas a tópicos extremamente específicos, usadas somente por especialistas nesses tópicos.
Ferramentas de Simulação [1985+]	Surgimento de ferramentas <i>standard</i> de simulação, criadas com áreas específicas de conhecimento em mente.
Criação de Sistemas Baseados em Simulações. [2000+]	Aplicação de simulações a temas contendo várias áreas de conhecimento.
Conceito do <i>Digital Twin</i> [2015+]	Uso de simulações como uma funcionalidade integral em vários sistemas, de maneira a fornecer assistência durante todo o ciclo da vida de uma dada aplicação

Realidade Aumentada (Augmented Reality - AR)

A realidade aumentada, ao contrário da realidade virtual que se baseia na criação de ambientes 100% virtuais, sobrepõe um ambiente virtual ao ambiente real. Consegue assim ligar diretamente o elemento humano ao mundo digital.

Como indicado por Fraga-Lamas et al. (2018), para criar um ambiente suportado por realidade virtual são necessários certos componentes essenciais, tais como:

- Captura de imagem, mas não limitada a câmaras;
- Sistemas de visualização. Estes podem ser tão comuns como ecrãs de telemóvel, ou dispositivos mais sofisticados usados na cabeça do utilizador, ou até ecrãs transparentes. Estes últimos ainda estão numa fase primitiva de desenvolvimento, mas têm um grande potencial para revolucionar a interação entre humanos e o mundo virtual.
- Conjunto de sensores que transmitem a informação a ser processada e apresentada. Esta categoria, com o desenvolvimento da *IoT*, não tem limites, indo desde informação armazenada em bases de dados, a equipamentos que transmitem os seus dados em tempo real
- Unidades de processamento. Estas unidades utilizam a informação recebida através dos vários sensores, calculam a sua posição relativa com o sistema de visualização e, por fim, conseguem sobrepor o ambiente virtual ao real, alterando-o conforme o utilizador se mova.

Sistemas de realidade aumentada mostram-se então como uma maneira eficaz e intuitiva de interação com o mundo virtual, podendo ser usados para otimizar a organização de armazéns, tarefas de supervisão, prototipagem, manutenção, entre outras áreas (Masood e Egger 2019).

Fabrico Aditivo

Um dos aspetos chave da indústria 4.0, como foi mencionado, é a flexibilidade e modularidade dos novos sistemas de produção. O fabrico aditivo, ou impressão 3D como muitas vezes referido, é aplicado na construção de objetos tridimensionais, usando modelos CAD como referência, depositando material por camadas através de um sistema computadorizado. Esta maneira de produção permite a rápida prototipagem de produtos, rápida e fácil customização destes e a otimização do uso de materiais. É assim óbvio o interesse destas tecnologias para a Indústria 4.0, sendo as impressoras 3D muitas vezes equipamentos compactos, facilmente movidos e com uma necessidade de inputs humanos mínima para a realização das suas tarefas. Alguns métodos usados na fabricação aditiva estão representados na Tabela 3 (Gao et al. 2015).

Tabela 3 – Diferentes Métodos de Fabricação Aditiva; adaptado de (Alcacer e Cruz-Machado 2019)

Método	Descrição	Materiais Usados
Jato de Ligante (<i>Binder Jetting</i> – BJ)	Uma infusão de material líquido ligante é depositada numa camada de pó fino. Isto liga as partículas de pó, sendo as várias camadas retraídas, permitindo a deposição de mais pó e assim a criação de uma nova camada do objeto.	• Polímeros • Cerâmicos • Compósitos • Metais • Híbridos
Deposição direta de Energia (<i>Direct Energy Deposition</i> – DED)	Um jato de energia concentrado, normalmente fornecida através de um poderoso laser, funde o material à medida que este é depositado.	• Metais • Híbridos
Extrusão de Material (<i>Material Extrusion</i> - ME)	O material é fundido e extraído através de um orifício, construindo o objeto camada a camada.	• Polímeros • Compósitos
Injeção de Matéria (<i>Material Jetting</i> – MJ)	Pequenas quantidades de material são seletivamente depositadas.	• Polímeros • Cerâmicas • Compósitos • Híbridos • Biológicos
Infusão de Pó (<i>Powder Bed Infusion</i> – PBI)	Semelhante ao método de jato ligante, este método utiliza um laser para fundir e unir as camadas de pó.	• Metais • Cerâmicas • Polímeros • Compósitos • Híbridos
Laminação de Folhas (<i>Sheet Lamination</i> – SL)	Finas folhas de material são fundidas de maneira a criar um objeto.	• Polímeros • Metais • Cerâmicas • Híbridos
Foto polimerização em Cuba (<i>Vat Photopolymerization</i> – VP)	Uma resina contida numa cuba é seletivamente curada através de lasers.	• Polímeros • Resinas

Integração Vertical e Horizontal de Sistemas

Finamente relacionado com as tecnologias da *IoT* e *Big Data*, Pérez-Lara et al. (2018) consideram a integração dos diferentes sistemas empresariais como sendo o primeiro passo para a completa adoção dos conceitos da Indústria 4.0.

A integração vertical refere-se à interconexão, um dos princípios da Indústria 4.0 mencionados, de todos os níveis de uma cadeia industrial, desde a gestão e design de produtos até ao fabrico, distribuição e venda.

Por sua vez, a integração horizontal refere-se à interconexão ao exterior. Há partilha de dados com parceiros de negócio, clientes ou consumidores, criando uma transparência de informação capaz de adicionar valor em todos os aspetos de um negócio.

Autómatos

Semelhantes às tecnologias de fabricação aditiva, a utilização de robôs altamente automatizados permite alcançar os objetivos de eficiência e modularidade da Indústria 4.0. De facto, o seu uso é considerado essencial para alcançar os níveis de flexibilidade de produção desejados. A capacidade de rapidamente alterar a configuração de máquinas, sem a necessidade de perder tempo a treinar humanos, e o avanço nas capacidades de processamento de dados, facilita a integração destes em sistemas de fabrico flexíveis. Presentemente, podemos encontrar o uso de robôs a realizar todo o tipo de tarefas, como a soldadura, pintura, armazenamento, distribuição, montagem entre outras. São equipamentos especificamente bem adaptados na realização de tarefas com elevado risco para a segurança de um operador humano (Graetz e Michaels 2018).

Como podemos ver na Figura 6, até 2015, à exceção do caso Japonês, o uso de robôs em ambiente industrial tem vindo a aumentar consideravelmente.

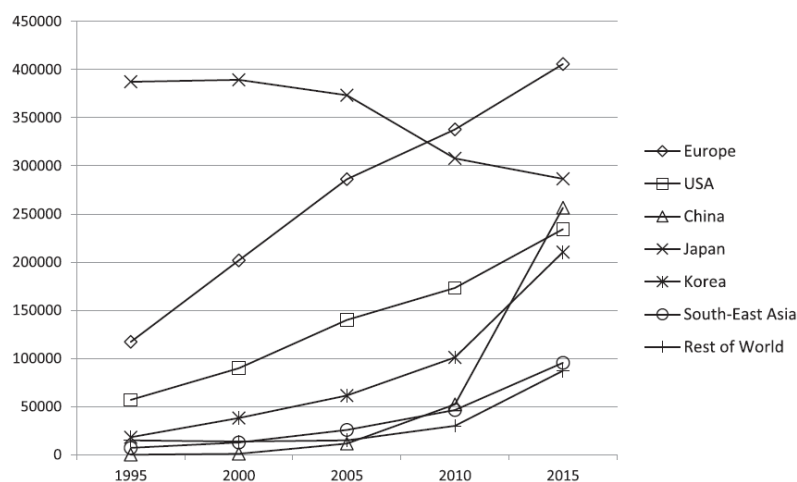


Figura 6 – Gráfico da evolução da adoção de robôs por mil trabalhadores (Cséfalvay 2019)

Cibersegurança

Finalmente, o último conceito tecnológico referido por Álcacer e Cruz-Machado (2019) é a cibersegurança. Dentro do contexto da indústria 4.0, a cibersegurança tem um papel extremamente importante na conservação da competitividade de uma qualquer indústria, como exprimido por Lezzi et al. (2018).

Esta revolve à volta de três conceitos: a confidencialidade, integridade e a disponibilidade. Não só estão estes três conceitos constantemente a competir entre si, tentando sempre equilibrar a segurança contra acessos indesejados com a disponibilidade dos dados, a existência da *IoT* aumenta exponencialmente a quantidade destes, e dos pontos de acesso, o que é contraproduativo se considerarmos a necessidade de confidencialidade. Aliado com o conceito de *Cloud Computing*, onde os dados muitas vezes se encontram na posse de terceiros, os riscos de segurança são extremos (Wegner et al. 2017).

2.3 Vantagens e Desafios

Como podemos ver pela secção anterior, a I4.0 não se trata de um conjunto de conceitos e tecnologias isoladas entre si, mas sim de uma complexa rede interligada, onde cada elemento influencia e impulsiona o desenvolvimento dos outros.

A sua introdução num ambiente industrial, ou não, traz consigo um enorme potencial de inovação e desenvolvimento. Infelizmente, contém também inúmeras dificuldades e obstáculos.

Neste tópico são abordadas as vantagens e desvantagens, resultantes da introdução dos conceitos da indústria 4.0, na estrutura empresarial atualmente instaurada.

2.3.1 Vantagens

Muitas das tecnologias envolvidas na I4.0 revolvem em volta da transparência de informação e da automatização de processos. O uso destes sistemas automáticos, capazes de realizarem uma avaliação do seu estado, e do estado do trabalho que estão a realizar, tal como de realizarem decisões em tempo real, levará a um aumento do desempenho dos equipamentos e redução dos custos de manutenção, através da previsão de falhas. Assim, realizando a substituição da manutenção periódica pela manutenção preditiva, possível com a forte capacidade computacional da I4.0 e um elevado número de sensores, é possível diminuir o tempo que um equipamento necessita de estar parado, ao mesmo tempo aumentando a sua esperança média de vida (Bojana Nikolic et al. 2017) (Lee et al. 2015).

Também mencionado na secção anterior foi o foco em tecnologias com um design flexível. O uso destas tecnologias flexíveis permitirá uma rápida prototipagem de diferentes designs, a rápida, eficiente e de baixo custo adaptação a mudanças nos requisitos do produto e, assim, a redução no custo da produção. O uso de modelos virtuais, que podem ser, por exemplo, usados para simular uma complexa linha de montagem flexível, facilitam esta adaptabilidade. Eventualmente, as linhas de montagem tradicionais, mostradas na Figura 7, poderão vir a ser substituídas por linhas de montagem reconfiguráveis, representadas na Figura 8, capazes de realizarem uma multiplicidade de tarefas, numa ordem variável, de maneira automática (Lins et al. 2018) (Dalenogare et al. 2018).

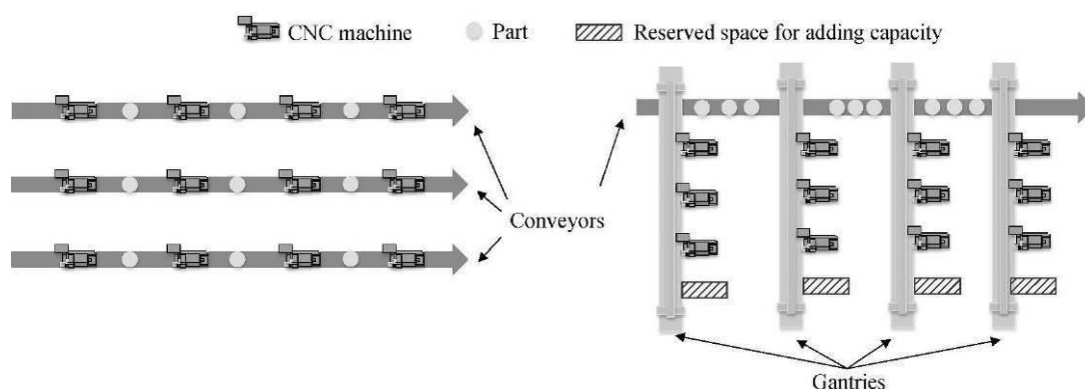


Figura 7 – Esquema de uma Linha de Montagem Tradicional (Koren et al. 2017)

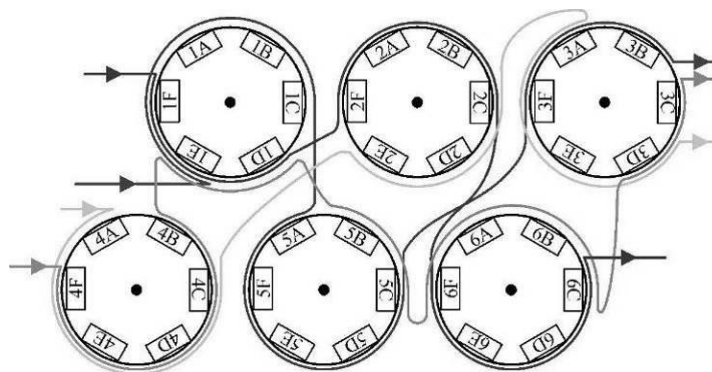


Figura 8 – Esquematisação de uma linha de montagem flexível (Koren, Gu e Guo 2017)

Outra vantagem, para além da redução dos custos de manutenção e de fabrico, trazida pelo uso de *Big Data* e a *IoT*, é o facto de ser possível partilhar horizontalmente e verticalmente, de maneira mais uma vez rápida e flexível, informação relevante aos diferentes departamentos e parceiros de negócio. Isto significa uma mais rápida reação a condições em mudança e uma melhor análise das situações, permitindo maximizar cada setor de uma dada indústria (Hofmann e Rüsch 2017).

Podemos então observar que a Indústria 4.0 tem o potencial de aumentar drasticamente a eficiência no uso de recursos, realizando otimização em todos os níveis do negócio. Em consequência disto, e sem custos adicionais, esta poupança de recursos materiais e energéticos leva também ao aumento da sustentabilidade ambiental da atividade. Uma vantagem não só no sentido ambiental, mas também no sentido legal, visto as preocupações ambientais serem um problema cada vez mais prominente e, consequentemente, também as regulações governamentais se tornarem cada vez mais restritivas. A automatização na recolha e processamento de dados fará este último aspeto, a conformidade com regulamentações legais, ainda mais fácil, podendo isto ser realizado de maneira automática (Kerin e Pham 2019).

Resumindo, podemos afirmar que os conceitos da Indústria 4.0 têm o potencial de:

- Aumento da eficiência e produtividade operacional;
- Aumento do trabalho colaborativo, vertical e horizontal;
- Aumento na flexibilidade e agilidade do negócio, permitindo uma melhor resposta à alteração de condições;
- Facilidade no cumprimento de regulações governamentais;
- Diminuição dos custos.

2.3.2 Desafios

O conceito da Indústria 4.0 não vem, porém, sem as suas dificuldades. Em Orzes et al. (2018) e Ing et al. (2019), os principais desafios à implementação da I4.0 foram identificados, tendo estes um maior impacto nas pequenas e médias empresas.

O primeiro obstáculo é o económico. I4.0 ronda fortemente em volta da integração e eficiente manipulação de variadas tecnologias, todas elas com necessidade de fortes investimentos monetários. Equipamentos avançados precisam de ser adquiridos e mantidos. Uma robusta rede de comunicação precisa também de ser instalada, em conjunto com variados equipamentos

sensoriais independentes de máquinas ou processos, de maneira a garantir a correta virtualização do ambiente empresarial. Em cima disto, é necessário adquirir infraestruturas, ou pelo menos contratar empresas exteriores, de maneira a ser possível a extração de valor dos dados recolhidos através do seu processamento. Tudo isto se junta para formar uma barreira considerável. No caso de pequenas e médias empresas, com pequenas margens de manobra financeiras, este facto pode muito bem ser proibitivo à adoção destes conceitos (Niemeyer et al. 2020) (Zambetti et al. 2020).

O próximo obstáculo enfrentado será a falta de mão de obra qualificada. A grande variedade de tecnologias usadas, em conjunto com extensa gama de áreas de conhecimento envolvidas, torna não só a ideia de iniciar uma transição para a I4.0 intimidante, como também difícil de realizar, visto a limitada disponibilidade de mão de obra qualificada capaz de convergir todos os conhecimentos necessários de uma maneira eficaz (Ing et al. 2019).

Os conceitos da *IoT* e a comum necessidade de usar serviços de *Cloud Computing* para o processamento de dados, leva a um outro fator de preocupação para não só pequenas e médias empresas, mas também para aquelas já com uma dimensão considerável. Este fator é a segurança. O aumento da transparência de dados, da sua partilha e geral quantidade leva a uma multiplicação dos pontos de acesso e, assim, a uma multiplicação dos riscos da quebra de privacidade. Isto traz não só riscos financeiros, estando o poder competitivo das empresas muitas vezes na confidencialidade dos seus projetos e tecnologias, mas também riscos legais, visto as empresas poderem vir a ser consideradas legalmente responsáveis pela proteção dos dados dos seus clientes (Alcacer e Cruz-Machado 2019) (Xu et al. 2018).

A falta de *standards* internacionalmente aceites para o tipo de operações realizadas na indústria 4.0, isto é, troca, manipulação, armazenamento e proteção de dados é também considerada uma forte barreira à sua adoção. Não existindo uma estrutura bem definida de como se deve implementar estes conceitos, muitas empresas, não conseguindo de maneira eficiente calcular os potenciais custos e ganhos de uma transição destas, podem decidir manter os seus modelos de negócio tradicionais (Schröder 2016) (Orzes et al. 2018).

Os diferentes obstáculos enfrentados na implementação dos conceitos da I4.0 podem ser sumarizados da seguinte maneira

- Necessidade de elevados investimentos financeiros.
- Falta de conhecimentos e mão de obra qualificada para a realização do trabalho.
- A falta de standards mundialmente aceites e aplicados.
- Preocupações com a segurança de dados.

2.4 Projetos e Incentivos à Indústria 4.0

A indústria 4.0, apesar de já ser largamente considerada o próximo passo na evolução do ambiente industrial, continua na sua infância, e a sua adoção limitada à elite da esfera empresarial, tendo em conta os custos necessários para que sejam observados ganhos significativos.

Ainda assim, já se podem observar bastantes avanços na direção da completa realização da Indústria 4.0, não sendo mais uma tendência futura, mas ocupando uma posição fulcral no planeamento de várias empresas, como por exemplo a Siemens e a Bosch, que já declararam a sua vontade de se tornarem líderes deste movimento (Xu, Xu e Li 2018).

Companhias como a AT&T, Cisco, GE, IBM e Intel fundaram a Industrial Internet Consortium, IIC, de maneira a melhor coordenarem prioridades em relação à criação de uma internet

industrial, tendo, até 2018, juntando-se 250 empresas a este consórcio. Um dos objetivos deste consórcio é a “aceleração do crescimento da internet industrial através da identificação, montagem, teste e promoção das melhores práticas” para a realização da I4.0 (Oztemel e Gursev 2018).

Em 2014 foi reportado existirem 45 projetos privados na União Europeia, concentrados no desenvolvimento de tecnologias focadas nos conceitos da Indústria 4.0, perfazendo, no seu total, 100 milhões de euros em investigação. Para além disso, na Alemanha, o apoio governamental a projetos de implementação destas tecnologias já ultrapassa os 450 milhões de euros, sendo este o valor destinado apenas a pequenas e médias empresas. Vários centros foram abertos de maneira a facilitar o acesso a aconselhamento e serviços de consultadoria especificamente para a I4.0 (Schröder 2016).

Neste mesmo ano, a Comissão Europeia declarou tecnologias como *cloud computing*, *smart factories*⁴ e a robótica, entre outras, todas tecnologias inseparáveis dos conceitos definidos pela indústria 4.0, como sendo essenciais para o aumento da produtividade e do refinamento dos modelos de gestão empresariais. Áreas como a fabricação aditiva, infraestruturas digitais combinadas com uma robusta rede de comunicação, a disponibilidade de mão de obra qualificada e a necessidade de uma estrutura legal robusta para a proteção e partilha de dados foram todas reconhecidas como sendo de extrema importância para o desenvolvimento económico da União Europeia mostrando que, mesmo que ainda não se tendo chegado a uma solução definitiva para os problemas que a Indústria 4.0 enfrenta, estes já são reconhecidos pela comunidade internacional (Davis 2015).

Para além de reconhecer a Indústria 4.0, várias ações foram tomadas para começar a enfrentar os seus maiores obstáculos. Questões como a posse, proteção e partilha de dados encontram-se sobre escrutínio e vários incentivos foram criados com o alvo de tornarem o ensino, treino e especialização de indivíduos nestas áreas mais atraente. Algumas destas ações, como a *Horizon 2020*, já fornecerem 80 mil milhões de euros em financiamento para programas de investigação e desenvolvimento dedicados à Indústria 4.0, ajudando na criação de protótipos e demonstrações destinadas a disseminar estes novos conceitos e a cimentar o seu interesse em todo o tipo de indústrias (Davis 2015) (Ing et al. 2019).

Vários dos seus estados membros, em concordância com as conclusões e considerações da Comissão Europeia, já começaram a focar um pouco mais a sua atenção em incentivar as suas respetivas indústrias a evoluírem em concordância com a Indústria 4.0. O mapa representado na Figura 9 mostra uma lista das diferentes iniciativas focadas na Indústria 4.0, tomadas por países Europeus até 2016.

Para além da Alemanha, temos a Itália, com o projeto *Fabrica del Futuro*, que financiou e incentivou projetos de investigação em área como fábricas reconfiguráveis, sustentabilidade, reciclagem de materiais, sistemas de controlo e interação homem-máquina, entre outras. A Grã-Bretanha, não mais membro da União Europeia, criou um número de centros de investigação, chamados de *Catapult Centres*, com o objetivo específico de acompanhar empresas na aquisição de, e facilitar o acesso a mão de obra especializada e projetos de investigação, em áreas como a fabricação aditiva, inovação de processos, tecnologias inteligentes, medicina e energias renováveis, entre outras. Estes centros são responsáveis por distribuírem e guiarem 2.5 mil milhões de libras em financiamento por empresas no Reino Unido. Finalmente, França também iniciou várias iniciativas com o intuito de demonstrar avanços tecnológicos na área da robótica, *IoT* e *Big Data*, tendo especial atenção em garantir o apoio na compreensão destas tecnologias, e dos seus potenciais benefícios, a pequenas e médias empresas (Davis 2015).

⁴ *Smart factories*: Fábricas inteligentes. Uma fábrica completamente de acordo com os conceitos da I4.0, altamente automatizada e altamente flexível.

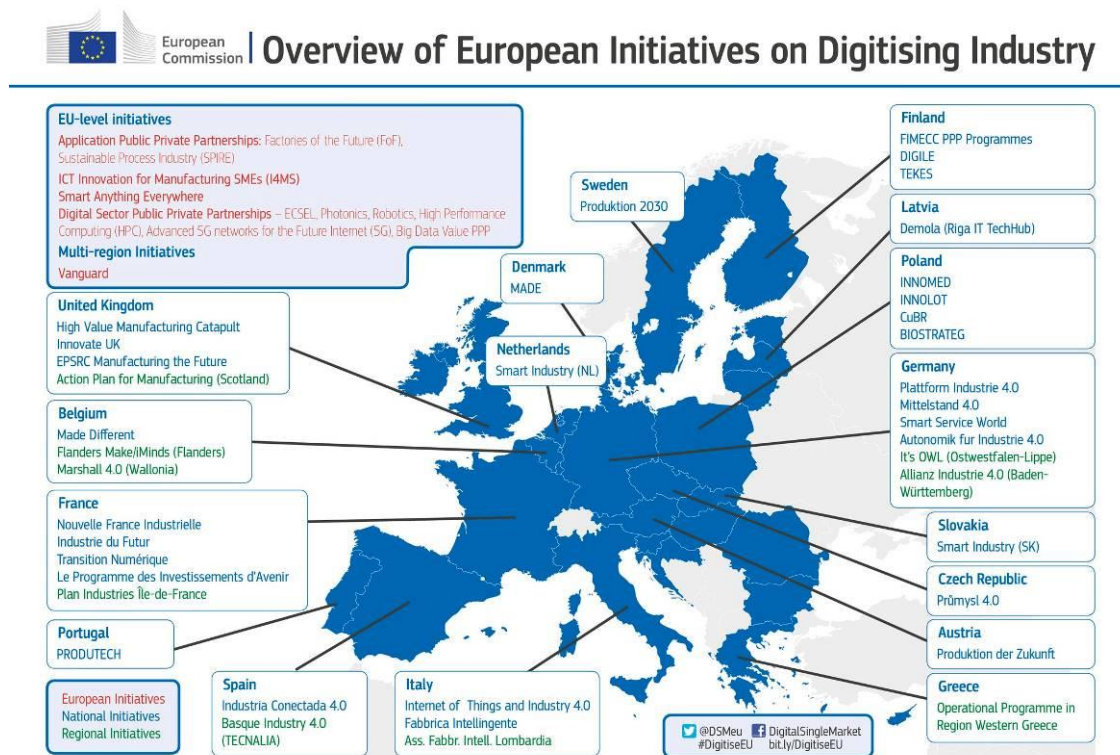


Figura 9 – Iniciativas tomadas por estados membros da União Europeia com o propósito de incentivar a adoção da indústria 4.0 até 2016 (Takakuwa et al. 2018)

Na Ásia, outro gigante no mundo da produção, a China, também demonstrou a sua dedicação à implementação dos novos conceitos industriais, tendo revelado um plano económico, “Made-in-China 2025”, para transformar e modernizar o seu ambiente industrial de acordo com a Indústria 4.0 (Xu, Xu e Li 2018).

O governo Taiwanês disponibilizou 3 mil milhões de euros em incentivos governamentais para a inovação industrial, a formação e treino de mão de obra altamente qualificada e construir uma fundação digital para a indústria taiwanesa. No Japão, a IVI (Industrial Value Chain Initiative) tem como objetivo a criação de normas de comunicação, tendo 140 empresas feito parte desta iniciativa até 2016. Nesta nação é já planeado o passo seguinte da Indústria 4.0, intitulado de Sociedade 5.0, onde os conceitos da I4.0 não se aplicam só ao mundo industrial, estando disseminados por todos os níveis da sociedade. Igualmente, o governo Sul Coreano planeia gastar 19 mil milhões de euros até 2020 na atração e desenvolvimento de investimentos privados em tecnologias de informação. O Japão e a Coreia do Sul são líderes na produção de patentes relacionadas com a inteligência artificial (Oztemel e Gursev 2018).

Semelhante à Figura 9, a Figura 10 mostra algumas das diferentes iniciativas desenvolvidas no continente Asiático com o objetivo de avançarem a adoção dos conceitos da I4.0.

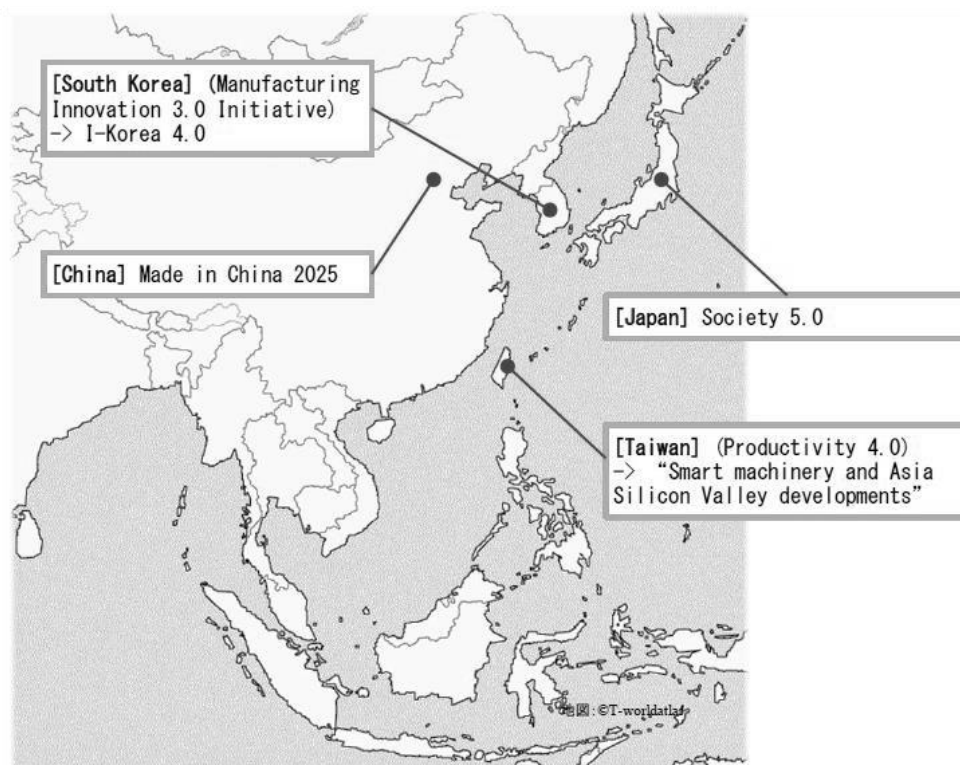


Figura 10 – Incentivos e programas dedicados á Indústria 4.0 no continente asiático (Takakuwa, Veza e Celar 2018)

Para além das mencionadas, existem várias outras iniciativas e projetos dedicados á Indústria 4.0, provenientes de corpos governamentais e privados por todo o mundo, não sendo esta uma lista exaustiva.

2.5 Retrofitting e a sua relação com a Indústria 4.0

2.5.1 Retrofitting

Em primeiro lugar, o que significa *retrofit*?

Retrofitting é, na sua essência, o processo de adaptação e instalação de novas ou diferentes tecnologias em equipamentos que estariam, de outra maneira, a entrar na obsolescência ou a necessitar de adaptação. É considerado uma prática comum, espalhada por todo o tipo de indústrias. Avanços tecnológicos conseguem muitas vezes aparecer inesperadamente e o processo de manter uma indústria completamente equipada com as mais recentes inovações é proibitivamente caro.

Este conceito não é algo novo ou restrito na sua aplicação, sendo historicamente uma solução que várias indústrias, nos mais variados ramos, recorreram para manter a sua competitividade na face de novos desenvolvimentos ou mudanças nas condições a que os seus equipamentos estavam expostos. Pode ser usado na construção civil, de maneira a conferir melhores capacidades antissísmicas a edifícios antigos, sendo um exemplo disto mostrado na Figura 11, ou a melhorar a sua eficiência térmica. Na indústria automóvel é possível realizar *retrofits* de maneira a tornar veículos previamente movidos a combustão interna em veículos híbridos ou até mesmo completamente elétricos, para não falar na adição de “pequenas” tecnologias como

*cruise control*⁵, ar condicionado, sensores de estacionamento entre outros. Estes são apenas alguns exemplos de usos do conceito de *retrofit*, não havendo limite para as áreas onde este pode ser aplicado (Zhou et al. 2016) (Foraboschi 2016) (Fuengwarodsakul 2009).



Figura 11 – Exemplo do *retrofit* de uma estrutura metálica para conferir propriedades anti sísmicas a um edifício (Zohrevand 2020).

Um bom exemplo do uso de *retrofitting* para a adaptação de equipamentos a novas condições de trabalho, em vez da adição de novas tecnologias, é a instalação de diferentes proas em navios de grande porte, como os cargueiros. Estes são equipamentos (ou sistemas de equipamentos) extremamente dispendiosos de produzir, especialmente os seus cascos, com expectativas de vida longas. Quando desenhados, as suas dimensões são projetadas a pensar em certas condições de trabalho, como a velocidade de cruzeiro e a carga a transportar, sendo que, últimos anos, muitos navios começaram a operar a velocidades mais baixas, ato designado por *slow-steaming*, de maneira a poupar combustível, reduzir os custos do transporte e cumprir com as normas de emissões. As dimensões da proa, desenhadas para facilitar a movimentação do navio a uma certa velocidade, podem agora ser um “choke point”⁶ a limitar a poupança de combustível, que a diminuição de velocidade traz. É assim realizado um *retrofit*, de maneira a que o navio possua uma proa apropriada (Oliver 2015)

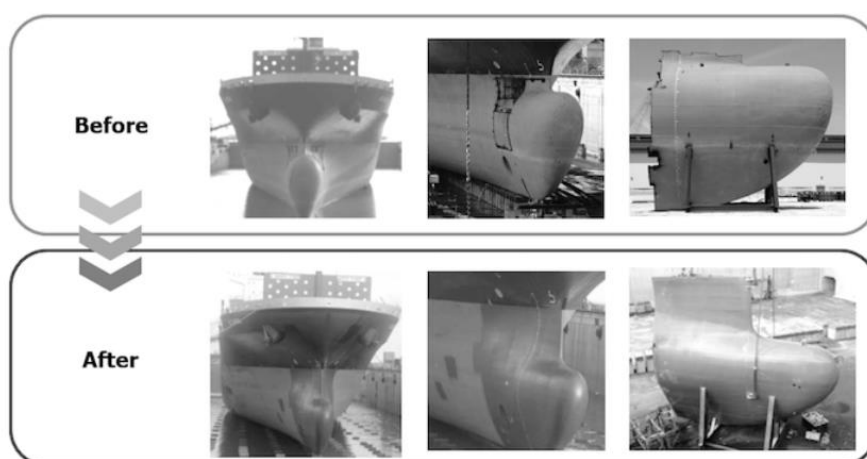


Figura 12 – Antes e depois de um *retrofit* à proa de um navio. (Yanagida 2018)

⁵ *Cruise control*: Tecnologia que permite que um veículo mantenha uma dada velocidade automaticamente.

⁶ *Choque point*: Ponto de estrangulamento. Neste contexto significa um aspeto limitante.

2.5.2 Retrofitting Dedicado à Indústria 4.0

O processo de retrofit mostra-se, assim, como sendo uma técnica viável para combater um dos maiores obstáculos à implementação dos conceitos da Indústria 4.0, principalmente em pequenas e médias empresas que investiram em equipamentos sem as características necessárias à integração na I4.0. Traz consigo a possibilidade de transformar equipamentos “normais” em equipamentos inteligentes, dotados das capacidades de sensorização e comunicação que permitem a recolha de dados e, assim, a sua integração na I4.0 (Zambetti et al. 2020) (Mourtzis et al. 2020).

A Tabela 4 mostra um número de projetos financiados pela União Europeia com o intuito de aprofundar as possibilidades do processo de *retrofit* e a adoção da Indústria 4.0.

Tabela 4 – Alguns projetos financiados pela UE concentrados no conceito de *retrofitting*, adaptado de (Ehrlich et al. 2015)

Programa da União Europeia	Nome do Projeto	Tópico
FP7	REFRESH [Re15]	<i>Retrofitting</i> das operações de distribuição marítima para a redução de emissões.
FP7	GRIP [Gr15]	<i>Retrofitting</i> de ferramentas de análise para o sector de construção naval.
HORIZON 2020	AIMACS [Ai15]	Sistema inteligente de controlo, auto otimizável, para o <i>retrofit</i> de máquinas.
HORIZON 2020	DECACDE [De15]	Desenvolvimento de um sistema de controlo de energia para o <i>retrofit</i> de linhas de produção industriais.
HORIZON 2020	EFENIS [Ef15]	<i>Retrofitting</i> para a transição de fabrico com baixas emissões de carbono.

Sendo uma opção ideal para o efeito de incentivar a adoção dos conceitos da Indústria 4.0, não deixa de ter as suas dificuldades.

A variedade de equipamentos que podem estar presentes numa única fábrica pode tornar o *retrofitting* destes, já de si um processo complexo, ainda mais complicado. São necessários uma variedade de conhecimentos para realizar com sucesso um *retrofit*, especialmente se este tiver o intuito da integração na I4.0. O engenheiro que esteja a coordenar uma destas modernizações tem de conseguir definir as necessidades do novo sistema, bem como reconhecer as diferentes particularidades de cada um dos equipamentos, garantindo a compatibilidade entre eles. Assim, ao realizar o *retrofit* dedicado a cumprir com os requisitos da indústria 4.0, é necessário convergir conhecimentos de engenharia mecânica, mecatrónica, informática, ciências da informação, entre outras (Garcia-Garza et al. 2019).

Esta variedade de equipamentos leva a uma pluralidade de métodos de modernização, sendo este outro dos fatores a dificultar a modernização de equipamentos para a I4.0.

Diversos trabalhos foram realizados com pertinência ao *retrofit* de equipamentos industriais. Em Al-Maeni et al. (2020) foi usada a tecnologia de realidade aumentada para facilitar o *retrofit* de uma máquina CNC, tal como em Mourtzis, Angelopoulos e Panopoulos (2020). Em Ferreira et al. (2017), uma quinadora sofre um *retrofit* aplicando a metodologia criada pelo projeto europeu MANTIS, sendo que Lins e Oliveira (2020) propuseram um sistema genérico, separando os requisitos para um *retrofit* destinado à indústria 4.0 em três categorias, representadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Processo de *retrofit* dedicado à indústria 4.0, adaptado de Lins e Oliveira (2020)

Categoria	Requisitos
Infraestrutura	• Definir as tecnologias de monitorização existentes e as suas capacidades • Adicionar sensores independentes para a monitorização do processo caso os integrados sejam insuficientes. • Adicionar sensores não diretamente relacionados com o funcionamento equipamento, mas capazes de trazer valor à aplicação.
Comunicação	• Definir as tecnologias de comunicação a usar. • Integrar estas tecnologias com os sistemas de controlo instalados • Criar vias de comunicação em tempo-real
Aplicação	• Definir sistema de controlo existente e as suas capacidades • Integrar os sistemas de controlo existentes com a nova rede de sensores e comunicação. • Integrar o novo sistema de controlo caso o original seja insuficiente • Adicionar capacidade de monitorização e controlo <i>online</i>

3 Prensa Hidráulica SATIM

3.1 Equipamentos Disponíveis no Mercado

Um fator importante no planeamento e definição de objetivos para um projeto de *retrofit*, além do estado atual do equipamento a intervir, são as características apresentadas pelos equipamentos semelhantes já disponíveis no mercado. Assim é possível avaliar se o equipamento em questão é irremediavelmente obsoleto ou não.

É importante comparar as capacidades de controlo, monitorização e comunicação, que os equipamentos laboratoriais modernos oferecem, com aquilo que é possível atingir fiavelmente por meio de um processo de *retrofit*. Que tipo de dados são capazes de monitorizar e fornecer ao exterior; que inputs de controlo aceitam e como é feita esta interação, quer com outros equipamentos, se existentes, ou com o utilizador. Isto, sem esquecer as suas capacidades de aplicação de tratamentos, neste caso, térmicos e de pressão.

Estes pontos ajudam a avaliar a ambição do projeto de *retrofit*, tal como a sua fiabilidade, comparando o custo da atualização, com o custo de um equipamento novo; sendo importante, não só os valores brutos destes investimentos, mas também a sua relação com as funcionalidades ganhas e as inovações que delas advêm.

Foram então encontradas duas prensas laboratoriais no mercado, com funcionalidades semelhantes, uma da *gibitrie Instruments*, outra da *Carver Inc*. Estas prensas apresentam características de controlo próximas do que se deseja alcançar com o projeto de *retrofit*. Não sendo esta uma pesquisa exaustiva, é, ainda assim, um bom ponto de comparação (gibitrie 2020) (Carver 2020).

A prensa disponibilizada pela *gibitre Instruments* está representada na Figura 13.



Figura 13 – Prensa Laboratorial da *gibitre Instruments* (*gibitre 2020*)

Nesta prensa é possível o controlo direto da posição dos pratos, a definição de ciclos de temperatura, e os seus gradientes, pressão ou força e posição, com um máximo de 24 degraus para cada ciclo. O controlo de temperatura é executado de forma individual em cada prato, sendo possível gravar até 3 conjuntos de ciclos. O comando é realizado por meio de um PLC.

A introdução e programação dos ciclos é realizada através de um monitor (HMI), permitindo este visualizar o processo em tempo real. Através de programas proprietários, a prensa é capaz de se ligar a um PC (instalado com o Microsoft Windows 7, 8 ou 10) e assim realizar registos da sua atividade. Vem equipada com uma porta e botão de segurança em conjunto com o certificado CE.

As suas características e dimensões estão representadas na Tabela 6 e Tabela 7, respetivamente.

Tabela 6 – Características da Prensa fornecida pela *gibitre Instruments*, adaptada de (gibitre 2020)

Característica	Unidades	Valor
Força Máxima	daN	25000
Área Máxima	mm*mm	200 x 200
Curso do Prato	mm	200
Potência de Consumo	kW	6
Temperatura de Serviço	°C	300
Resolução da Temperatura	°C	0,1
Erro máximo no valor da Temperatura	°C	0,5
Resolução da Força	N	10
Erro máximo da Força	N	100
Alimentação Elétrica	VAC	380 tri + neutro. 50Hz

Tabela 7 – Dimensões da Prensa fornecida pela *gibitre Instruments* adaptada de (gibitre 2020)

Dimensões	Unidades	Valor
Altura	mm	1800
Largura	mm	650
Comprimento	mm	950
Peso	kgf	520

Como podemos ver, esta prensa apresenta características de controlo adequadas. Apesar disso, e como poderá ser observado na secção seguinte, é mais fraca, em termos de capacidade de força e de temperatura máxima, do que a prensa da SATIM. O seu controlo é realizado através de programas proprietários e, por isso, não flexíveis, nem fáceis de integrar numa rede *IoT*. O único método de interação com o equipamento é através do painel integrado na sua estrutura.

A prensa disponibilizada pela *Carver, Inc* está representada na Figura 14.



Figura 14 – Prensa Laboratorial da *Carver, Inc* (*Carver 2020*)

As capacidades de controlo desta prensa são semelhantes à anterior, usando um monitor (agora a cores). Consegue controlar a variação de temperatura em rampa; o controlo e monitorização da força e temperatura é em tempo real, mas não o deslocamento do prato. É capaz de guardar até 250 “receitas” de temperatura e força, mostrando previsões gráficas destes ciclos, tal como registar internamente um histórico do seu uso. Estes dados podem ser acedidos através de uma ligação sem fios. Em termos de segurança vem equipada com uma porta de segurança, com trinco, em conjunto com o certificado CE.

As características e dimensões para o modelo AUTOFOUR/4818-PL,H estão representadas na Tabela 8 e Tabela 9, respetivamente.

Tabela 8 – Características da Prensa Laboratorial Disponibilizada pela *Carver, Inc*, adaptada de (*Carver 2020*)

Característica	Unidades	Valor
Força Máxima	daN	48000
Área Máxima	mm*mm	450 x 450
Curso do Prato	mm	100
Potência de Consumo	kW	6
Temperatura de Serviço	°C	Até 500
Alimentação Elétrica	VAC	230, 1ph

Tabela 9 – Dimensões da Prensa Laboratorial Disponibilizada pela Carver, Inc, adaptada de (Carver 2020)

Dimensões	Unidades	Valor
Altura	mm	1820
Largura	mm	1400
Comprimento	mm	915
Peso	kgf	1500

Esta prensa apresenta então características que excedem a prensa SATIM em termos não só de controlo e monitorização, mas também de capacidades de aplicação de força e temperatura. Apesar disso, o seu controlo é, mais uma vez, realizado através de um programa proprietário, de difícil integração numa rede privada, não tendo também nenhuma capacidade de controlo remoto.

É interessante de notar que, em máquinas de cariz industrial, podemos observar todas estas características como comuns, sendo estas fornecidas com um maior nível de automação e o seu layout ser organizado para facilitar a sua integração com elementos robóticos, capazes de diminuir a intervenção humana necessária. Salienta-se assim a diferente disseminação dos conceitos da Indústria 4.0 entre estes dois ambientes. Empresas como *SHIBAURA MACHINE* ou a *WICKERT* oferecem integração com a *IoT* e a capacidade de integração com uma rede de comunicação industrial, sendo que a *WICKERT* realiza também *retrofits* personalizados, com a indústria 4.0 em mente, de equipamentos de terceiros (Shibaura 2020) (WICKERT 2020).

Apesar disso, esta diferença no avanço da indústria 4.0 pode ser explicada pelo facto de, num ambiente laboratorial, a necessidade de altos volumes de produção ser mínima, tal como a variedade de operações realizadas ser maior. Não existindo a necessidade de constante produção nem de altos níveis de eficiência, os equipamentos laboratoriais são desenvolvidos a pensar em aplicações pequenas e de alta precisão.

É, assim, relativamente fácil obter equipamentos laboratoriais com uma elevada capacidade de controlo automático e altos níveis de precisão, não estando estes completamente preparados para a integração numa vasta rede de *IoT*.

Em suma, para equipamentos laboratoriais, podemos esperar encontrar:

- Interfaces gráficas intuitivas;
- Controlo em malha fechada das variáveis do processo;
- Parametrização flexível dos ciclos de trabalho;
- Armazenamento do histórico de funcionamento;
- Monitorização em tempo real.

No caso de equipamentos industriais, pode ser esperado todos os aspetos anteriores mais:

- Adaptabilidade para completa automatização do processo;
- Integrabilidade na *IoT* de origem.

Salienta-se ainda o facto de os equipamentos serem entregues com os correspondentes certificados legais (certificação CE, p.e.) e os certificados técnicos (calibração e inspeção), que resultam de uma análise profunda, executada por profissionais especializados, no decorrer do

desenvolvimento do equipamento. No caso de ser realizado um processo de *retrofit*, este será, em princípio, levado a cabo por indivíduos não responsáveis pelo projeto original e conceção do equipamento, o que pode levar a dificuldades inesperadas, especialmente se o processo envolver a substituição de componentes ou subsistemas essenciais ao funcionamento.

3.2 Descrição da Prensa SATIM P.M.L. I

3.2.1 Características Técnicas Gerais

O equipamento que se encontra no laboratório de compósitos do INEGI é a prensa hidráulica SATIM P.M.L. I, representada na Figura 15. Trata-se de uma prensa de movimentação ascendente com acionamento hidráulico. Este acionamento é realizado através de um motor de indução trifásico, a acionar uma bomba hidráulica. A bomba alimenta o cilindro conectado ao prato inferior (sendo o prato superior fixo). Uma válvula direcional define a direção do movimento e uma válvula proporcional limita a pressão gerada. Esta válvula é responsável pelo controlo da pressão aplicada ao cilindro hidráulico e, conseqüentemente, pela força exercida pelo prato inferior da prensa e sua velocidade de movimentação. Na Figura 19 é mostrado o esquema hidráulico original da prensa.



Figura 15 – Vista frontal da Prensa P.L.M. I

Ambos os pratos estão equipados com resistências de aquecimento, nove por prato, sendo o controlo da alimentação destas resistências controlado por *triacs*⁷. A temperatura de cada prato é monitorizada através de um único termopar localizado no centro da sua face. O arrefecimento dos pratos é realizado através da circulação de ar ou água no seu interior, sendo a escolha destes dois meios dependente da temperatura a que se encontram os pratos.

As características técnicas e estruturais, retiradas do catálogo, estão representadas na Tabela 10 e na Tabela 11, respetivamente.

⁷ TRIAC: Triode for Alternating Current é um componente elétrico capaz de comutar a direção a que permite a passagem de corrente elétrica a altas frequências.

Tabela 10 – Características da Prensa SATIM P.M.L. I

Característica	Unidades	Valor
Força de Avanço/Recuo	daN	40000 / 15000
Área Máxima de Trabalho	mm*mm	400 x 400
Área Mínima de Trabalho	mm*mm	200 x 200
Curso do Cilindro	mm	400
Diâmetro do Êmbolo/Haste	mm	125 / 90
Velocidade de Aproximação/Trabalho	mm/s	20 / 0,5-1
Potência do Motor Elétrico da Bomba Hidráulica	kW	4
Potência de Aquecimento Prato	kW	6,3
Temperatura de Serviço	°C	400
Taxa Variação de Temperatura	%/min	5
Consumo de Água no Arrefecimento	m ³ /h	1
Alimentação Elétrica	VAC	380 tri + neutro

Tabela 11 – Dimensões da Prensa SATIM P.M.L. I

Dimensões	Unidades	Valor
Altura	mm	2000
Altura do Prato de Trabalho	mm	1100
Largura do Prato de Trabalho	mm	500
Largura	mm	700
Comprimento	mm	1460
Peso	kgf	1000

Na sua configuração original, a prensa é controlada através de um painel de comandos que contém um conjunto de botoneiras, seletores e mostradores. Estes permitem o acionamento da elevação do prato, de maneira automática e contínua, caso não seja interrompido, até à sua posição máxima, podendo a descida do prato ser realizada manualmente.

Tem a capacidade de definir ciclos de trabalho com um patamar de temperatura e três de pressão. Pode somente definir um ciclo de cada vez, sendo este iniciado manualmente ou programado para ocorrer a uma dada hora.

O seu uso, de momento, é focado no fabrico de placas compósitas de carbono, através da aplicação de ciclos de pressão e temperatura, levando à consolidação e conformação das mesmas.

3.2.2 *Sistemas de Controlo*

A prensa pode então ser dividida em 3 secções ou subsistemas de maior relevo:

- Sistema Hidráulico de Alta Pressão
- Sistema de Aquecimento
- Sistema de Arrefecimento

O diagrama da Figura 16 resume o funcionamento destes sistemas.

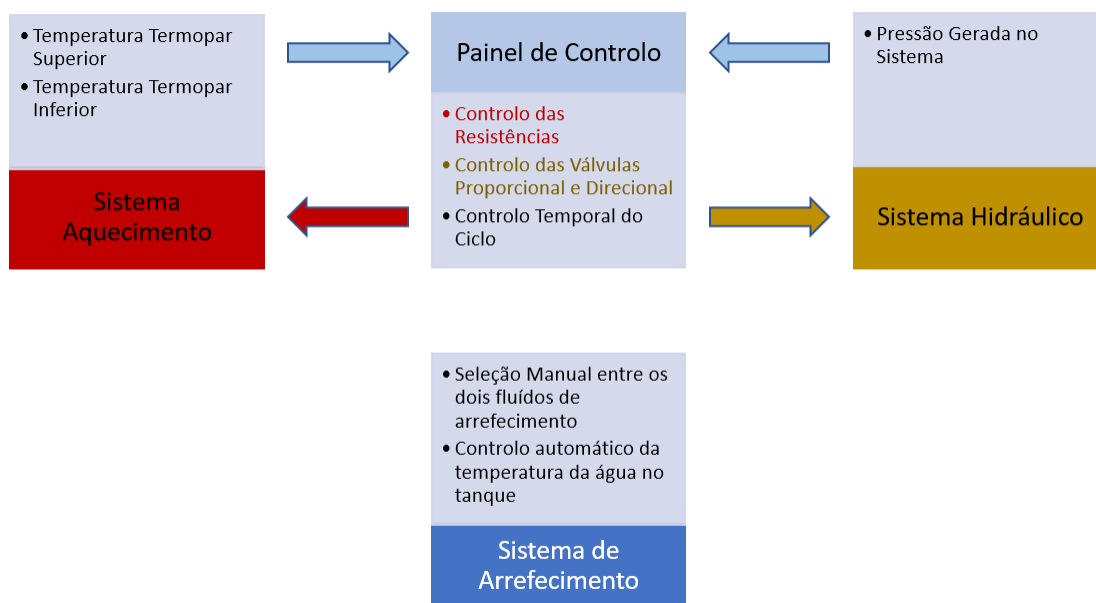


Figura 16 – Diagrama do Funcionamento da Prensa

O painel de controlo, representado na Figura 17 com a descrição dos seus controladores principais na Tabela 12, controla o sistema hidráulico e o sistema de aquecimento, sendo o sistema de arrefecimento controlado manualmente.

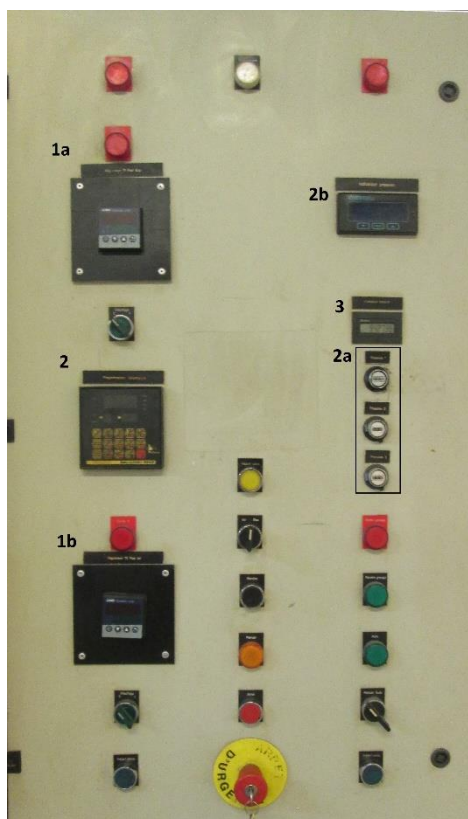


Figura 17 – Painel de Controlo Atual

Tabela 12 – Descrição das funcionalidades dos controladores principais do painel de controlo.

Número	Nome	Função
1a	Controlador Prato Superior	Controlador de temperatura para o prato superior.
1b	Controlador Prato Inferior	Controlador de temperatura inferior.
2	Programador de Pressão	Programador do ciclo e pressão
2a	Potenciómetros	Potenciómetros que definem os três patamares de pressão.
2b	Mostrador Digital de Pressão	Mostrador digital da pressão captada pelo sensor.
3	Mostrador Digital Horário	Mostrador digital do tempo total de trabalho da prensa.

A Figura 18 mostra com maior detalhe as botoneiras de controlo do sistema, estando a sua função descrita na Tabela 13.

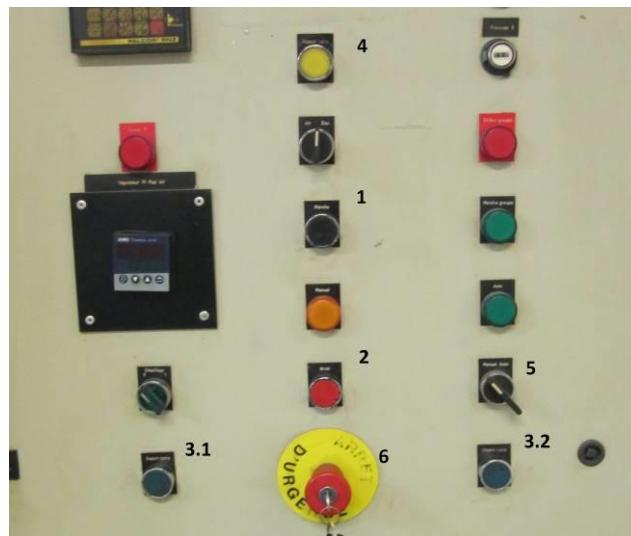


Figura 18 – Detalhe do painel de controlo original

Tabela 13 – Funções do painel de controlo

Número	Nome	Função
1	Marcha	Energiza o circuito analógico de controlo.
2	Paragem	Corta a energia ao circuito analógico de controlo.
3.1 e 3.2	Bi-Manual	Com atuação simultânea permite ativar o sistema hidráulico. No modo manual fecha o prato, no modo automático começa um ciclo.
4	Baixar	No modo manual, permite baixar o prato.
5	Manual/Auto	Seleciona entre o modo manual e o modo automático
6	Emergência	Corta totalmente a alimentação elétrica à prensa.

O sistema hidráulico é controlado pelo elemento 2 na Figura 17. Este permite programar o ciclo de pressão em conjunto com os três potenciômetros (elementos 2a na Figura 17), definindo os três patamares do ciclo. O display 2b mostra a pressão captada pelo sensor.

O controlo da força que é aplicada aos pratos é assim realizado de maneira pouco precisa. Não havendo dispositivo que meça a força a ser aplicada no prato inferior, esta é controlada simplesmente pelo controlo de pressão realizado pela válvula proporcional. Assim, este método de controlo de força não tem em conta perdas de carga que possam ocorrer e atritos entre as partes móveis da prensa, sendo muito vulnerável a perturbações exteriores.

A Tabela 14 mostra a composição do sistema hidráulico e o seu esquema pode ser visualizado na Figura 19.

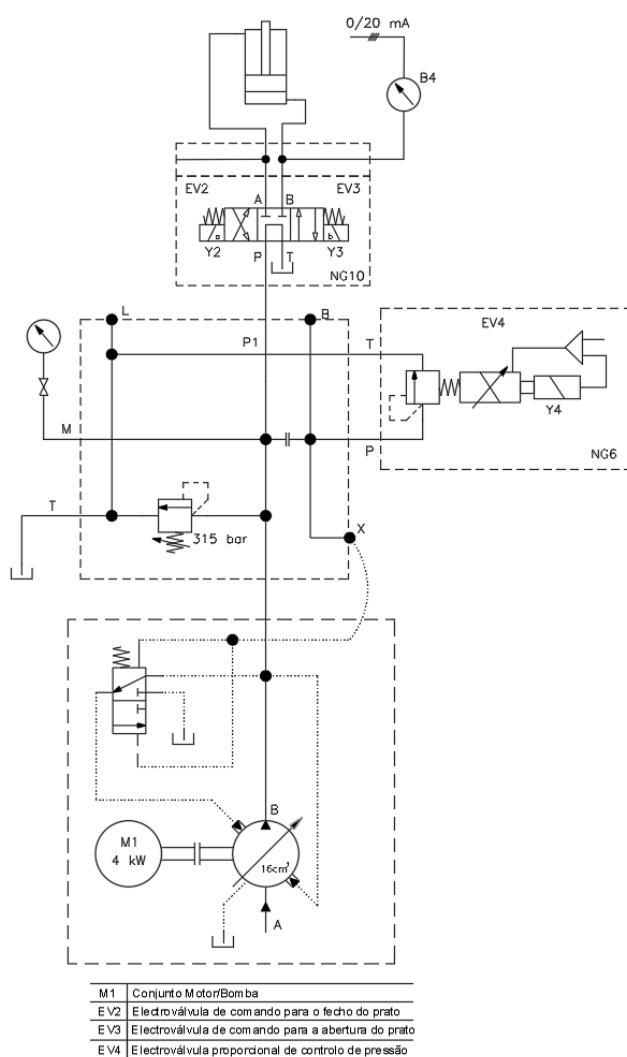


Figura 19 – Esquema original do sistema hidráulico de alta pressão.

O esquema mostrado é o esquema original do manual da prensa. Este esquema não mostra a existência de qualquer válvula de contrapressão que crie contrapressão durante a descida do prato. Assim, existe a possibilidade que, durante a descida, ocorra cavitação na câmara superior. Após uma inspeção da central hidráulica, não foi encontrada nenhuma válvula que pudesse estar em falta no esquema, sendo que o facto de a válvula direcional estar numa cota superior à entrada da câmara inferior do cilindro, poderá criar uma contrapressão suficiente para impedir a ocorrência de cavitação. Mesmo assim, é aconselhada a instalação de uma válvula contrapressão para assegurar o bom funcionamento do equipamento.

Tabela 14 – Composição do sistema hidráulico de alta pressão

Componente	Imagem	Descrição
Cilindro		• Cilindro Hidráulico de Atuação dupla • Curso: 400mm • Diâmetro do Êmbolo: 125x90 mm
Tanque + Bomba		• Conjunto motor/bomba de 4Kw. • Alimentação 3x230 VAC; 9.2A • Tanque de 63L.
Válvula Proporcional		• Válvula proporcional. • Gama: 5.5 – 315 bar
Válvula Direcional		• Válvula direcional monoestável. • Pressão máxima 315 bar
Manómetro Analógico		• Manómetro analógico conectado antes da válvula direcional. • Gama: 0 – 400 bar
Transdutor de Pressão		• Transdutor de Pressão B4 conectado depois da válvula direcional. • Gama: 0 – 400 bar 0 – 20 mA
Controlador + Potenciómetros		• Em conjunto permitem definir um ciclo de com 3 patamares de pressão.
Display		• Mostra o valor lido pelo sensor de pressão.

O sistema de aquecimento é composto por um conjunto de resistências, estando a sua posição mostrada na figura correspondente na Tabela 15; estas são controladas pelos controladores 1a e 1b, na Figura 17. Como foi dito, a temperatura de cada prato é monitorizada por um único termopar.

A Tabela 15 mostra a composição total do sistema de aquecimento.

Tabela 15 – Composição do sistema de aquecimento

Componente	Imagem	Descrição
Resistências		Conjunto de resistências a totalizar 4,5 kW por prato.
Controlador de Temperatura do Prato Superior		- Controla a temperatura do prato superior através da comutação de SSR. - Sinal luminoso de aviso para o excesso de temperatura.
Controlador de Temperatura do Prato Inferior		- Controla a temperatura do prato superior através da comutação de SSR. - Sinal luminoso de aviso para o excesso de temperatura.
Termopares	---	Tipo K. Um por prato, localizado no centro destes.

O arrefecimento é realizado, como foi dito, através de água ou ar. Na sua configuração original a água usada era a da rede, sendo que previamente a este projeto foi instalado um termorregulador. Este termorregulador consegue arrefecer a água usada de maneira a ter um maior controlo da taxa de variação da temperatura, ainda que de forma limitada. Todo o procedimento de controlo deste sistema, a troca entre os fluídos de arrefecimento e a temperatura a que a água é arrefecida, pelo termorregulador, são realizados manualmente.

A Tabela 16 mostra a composição do sistema de arrefecimento e o seu esquema pode ser visualizado na Figura 20.

Tabela 16 – Composição do sistema de arrefecimento

Componente	Imagem	Descrição
Termorregulador		• Termorregulador TT-137 B/BP 12kW • Controlador de temperatura MP-888 • Arrefecimento/Aquecimento de água até 160 °C, quando em circuito fechado, possibilitado com o aumento de pressão.
Tanque de Expansão		• Tanque de expansão para a água que arrefece os pratos
Bomba		• Bomba Hidráulica 840 W • Gama: 6 – 10 bar 0 – 90 °C • Alimentação: 1x230 VAC; 3.8 A • Caudal: 2 m³/h
Coletor Quente e Frio		• Conjunto de coletores que direcionam água fria para os pratos e quente para o tanque. • Através da manipulação de válvulas, permite purgar as mangueiras de água e utilizar ar para o arrefecimento.

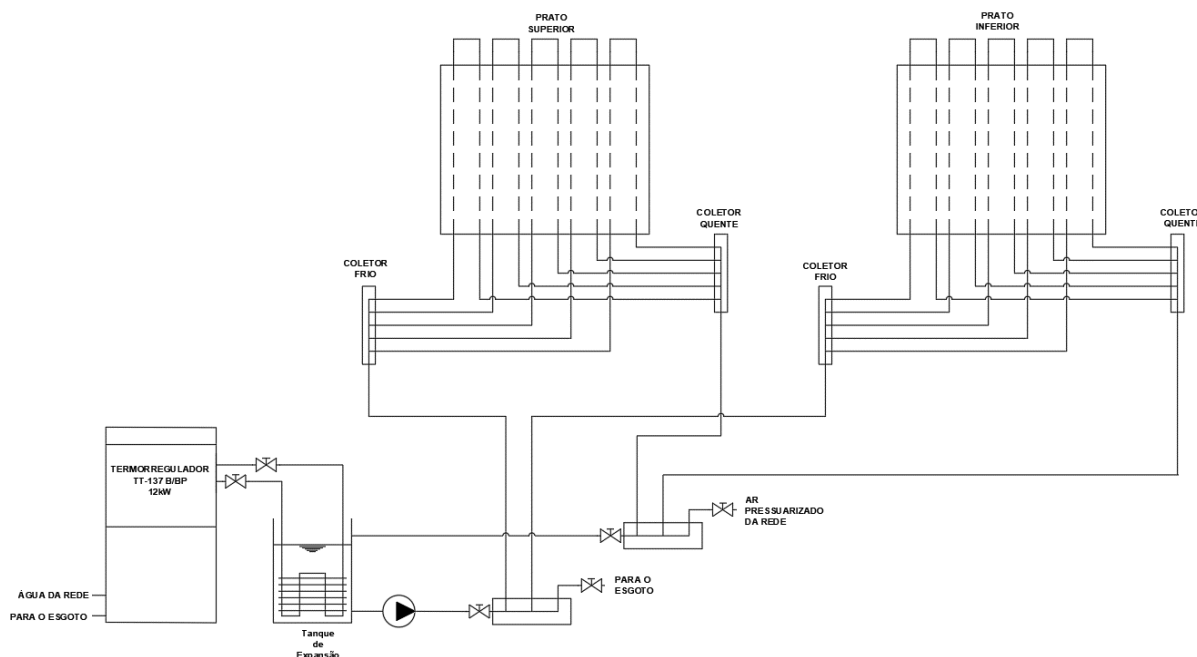


Figura 20 – Esquema hidráulico do sistema de arrefecimento

3.2.3 Insuficiências do Equipamento Original

Como se pode observar pela descrição do equipamento original, apesar de realizar a sua função de maneira aceitável, num ambiente moderno e adaptado aos conceitos da Indústria 4.0 apresenta diversas falhas.

Em primeiro lugar, o facto de a sua interface ser constituída completamente por botoneiras, outros elementos não computadorizados e a não existência de, por exemplo, um sistema de login, barrando completamente o acesso a definições, configurações e meios de atuação, permite que qualquer indivíduo, com acesso à prensa, altere configurações e realize ações potencialmente perigosas.

De seguida, o sistema encontra-se sem qualquer capacidade de comunicação. Este facto, por si suficiente para classificar a prensa como incompatível com os conceitos da indústria 4.0, significa a impossibilidade de qualquer acesso remoto, quer com o intuito de manipulação ou simples recolha e monitorização de dados.

Quanto ao seu controlo, existem também deficiências que limitam o seu funcionamento. Em primeiro lugar, o controlo da força aplicada ao prato inferior é realizado através do valor da pressão do fluido hidráulico imediatamente após a válvula direcional. Esta maneira indireta de ler um dos parâmetros fundamentais à realização dos processos desejados não tem em consideração o erro causado por eventuais atritos existentes entre os componentes móveis do equipamento, desalinhamento dos pratos ou perdas de carga que ocorram no sistema hidráulico. É também, com a configuração atual, impossível controlar de forma direta e precisa o deslocamento do prato, e, com isto, a espessura do material processado, algo que, num ambiente de investigação e desenvolvimento, pode ter bastante interesse.

Para averiguar esta situação, realizou-se um teste experimental, com o objetivo de quantificar a diferença efetiva entre a pressão monitorizada pela máquina e a força transmitida para o prato inferior. Por razões de segurança e devido à necessidade de se realizar manutenção à central hidráulica, foi decidido que o teste não passaria dos 150 bar.

Assim, utilizando uma única célula de carga no centro do prato, em conjunto com uma unidade de condicionamento de sinal, foram aplicadas várias pressões utilizando os potenciômetros do painel de controlo, registando os valores indicados pelo transdutor e os valores de fornecidos pelo módulo de acondicionamento. Através do certificado de calibração correspondente à célula usada e com o módulo de condicionamento de sinal corretamente configurado, os valores de corrente fornecidos por este foram convertidos em valores de força pela equação 3.1.

$$F = 15621 * I - 62110 \quad (3.1)$$

Onde:

F é o valor de força equivalente, [N];

I é o valor de corrente fornecido pelo módulo de condicionamento de sinal, [A].

Utilizando a equação 3.2, os valores de força foram convertidos em valores de pressão.

$$P = \frac{F}{A} * 10^{-5} \quad (3.2)$$

Onde:

P é o valor de pressão equivalente, [bar];

F é o valor de força obtido pela equação 3.1, [N];

A é a área do êmbolo do cilindro hidráulico, [m²].

Os resultados deste teste encontram-se representados na Figura 21.

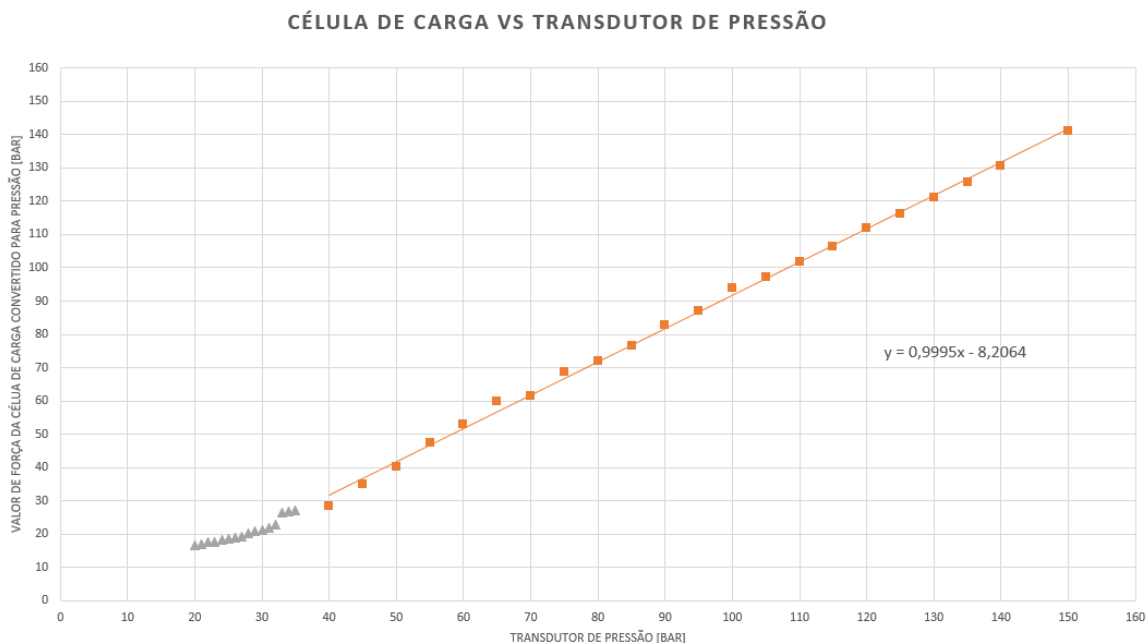


Figura 21 – Comparação entre o valor lido por uma célula de carga e o sensor de pressão original

Como podemos observar, a linha de tendência apresenta um declive quase unitário, como devia, com um *off-set* de quase 10 bar. Este *off-set* pode ser explicado pelo peso do êmbolo e da haste do cilindro mais o do prato inferior, o atrito dos vedantes e a possível necessidade de recalibrar o transdutor de pressão.

O problema surge na zona de menor pressão, entre 15 e 30 bar, onde o comportamento não é linear. Esta é a zona onde atualmente ocorrem a grande maioria dos trabalhos, sendo que o facto de prensa ter sido projetada para trabalhar a pressões muito mais altas, causa incerteza no controlo da pressão do circuito hidráulico e, assim, na força a ser aplicada nos pratos. A Figura 22 mostra esta zona em maior detalhe.

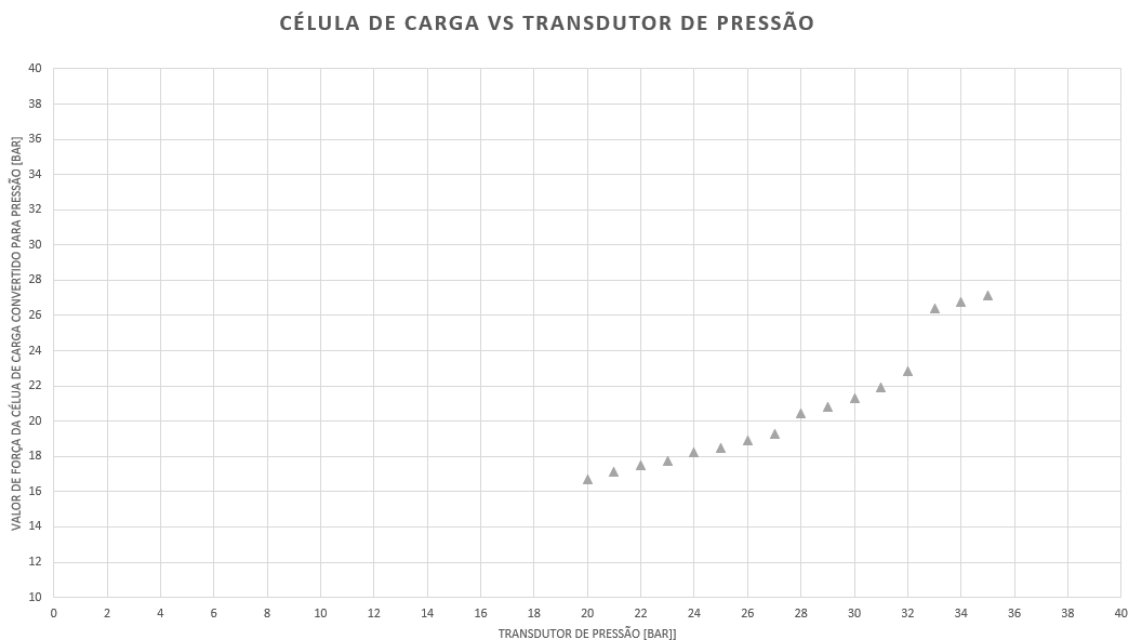


Figura 22 – Detalhe da zona de comparação entre a célula de carga e o transdutor.

Esta zona, tal como a existência de um *off-set*, realçam a necessidade de implementar um sistema de controlo de força em circuito fechado, capaz de monitorizar diretamente a força aplicada durante um ciclo de trabalho.

O controlo de temperatura apresenta também problemas. Em primeiro lugar, o *feedback* recebido pelo circuito de controlo provém apenas de dois termopares, um para cada prato, colocados no seu centro, não tendo estes a capacidade de medir precisamente a distribuição de temperaturas por toda a área dos pratos. Em segundo lugar, os sistemas de aquecimento e arrefecimento são também limitados. Como foi explicado na secção anterior, estes sistemas apresentam estratégias de controlo independentes, sendo que o controlo do arrefecimento por via de dois meios causa variações bruscas na taxa de arrefecimento, como se pode ver na Figura 23, dos pratos. Esta variação brusca no arrefecimento tem como consequência a possível criação de tensões internas e defeitos nas peças em produção. Esta taxa é também dificilmente regulada, limitando a variedade de tratamentos que se podem realizar. Esta limitação, em conjunto com a impossibilidade de monitorizar as temperaturas dos pratos em mais que um ponto, é especialmente agravante num ambiente laboratorial. Mostra-se também, na Figura 24, a taxa de aquecimento dos pratos.

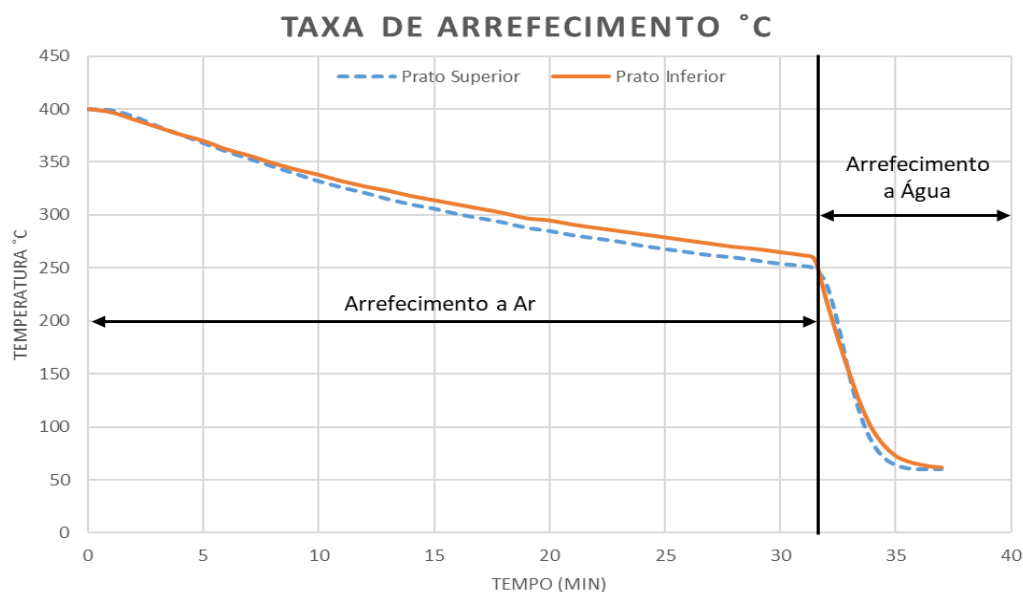


Figura 23 – Taxa de arrefecimento dos pratos a ar e a água

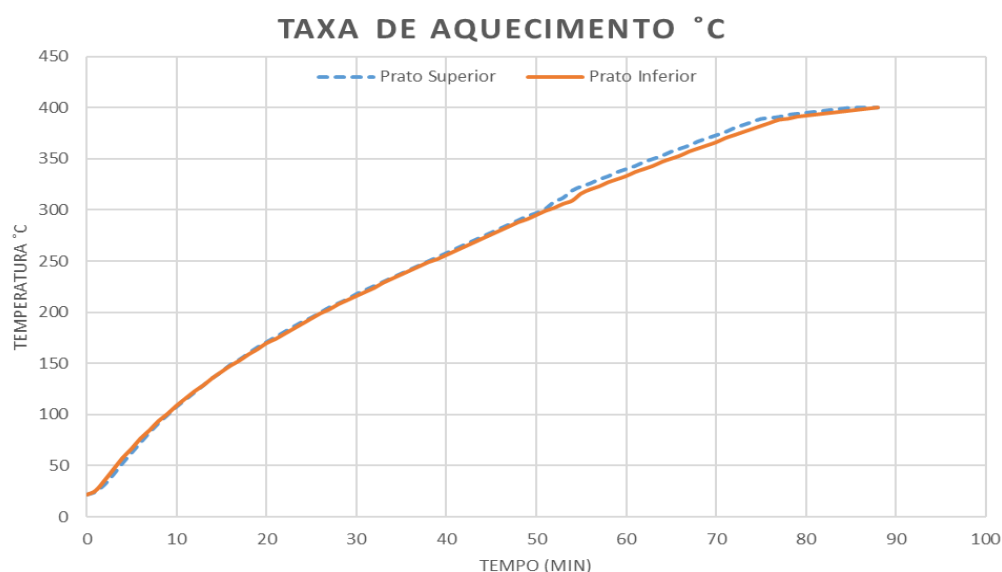


Figura 24 – Taxa de Aquecimento dos pratos

A Figura 25 e a Tabela 17 mostram a distribuição de temperaturas no prato inferior da prensa, resultado de uma avaliação experimental executada com uma câmara termográfica. Note-se que existe uma zona central com uma temperatura mais elevada que o resto do prato, indiciando que a leitura realizada por apenas um termopar, localizado nesta zona, não será a estratégia mais acertada para uma monitorização compreensiva do processo.

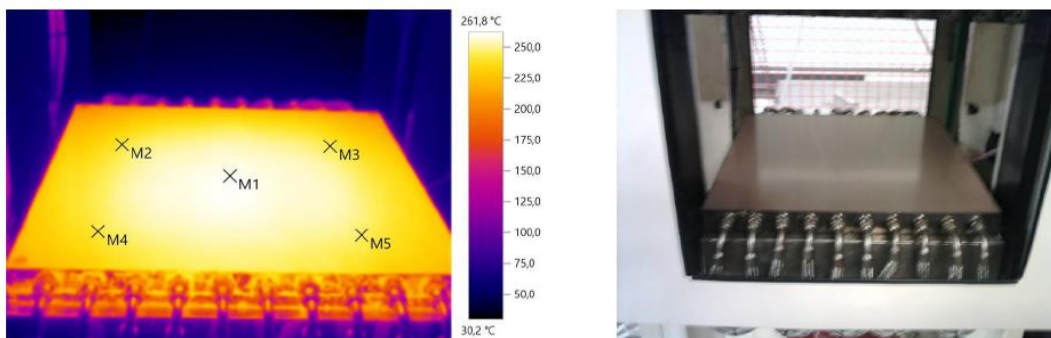


Figura 25 – Distribuição de temperatura no prato inferior

Tabela 17 – Temperaturas medidas na avaliação do prato inferior

Objetos de Medição	Temp. [°C]	Emissividade	Temp. refl. [°C]	Comentários
Ponto de medição M1	259,9	0,95	20,0	Ponto Central
Ponto de medição M2	232,2	0,95	20,0	-
Ponto de medição M3	236,1	0,95	20,0	-
Ponto de medição M4	232,6	0,95	20,0	-
Ponto de medição M5	238,8	0,95	20,0	-

O sistema de controlo é, na sua maioria, constituído por eletrónica analógica. Este facto limita a sua configuração e o seu comportamento, sendo que o sistema somente consegue definir ciclos com um patamar de temperatura e três de pressão; não sendo possível, como foi mencionado, controlar o processo pela força exercida no material, com um nível de precisão aceitável, ou a sua espessura, limitando o tipo de tratamentos que se podem realizar. Para além disso, não existe qualquer armazenamento histórico da atividade da prensa. É assim impossível realizar qualquer análise, manual ou automática, do seu desempenho.

Por fim, o equipamento apresenta uma idade muito elevada. Alguns dos seus componentes começam a apresentar falhas de funcionamento e os seus certificados de segurança não se encontram em conformidade com as normas atuais.

O equipamento apresenta então um conjunto de características e funcionalidades insuficientes quando avaliadas através do espectro da Indústria 4.0. Resumidamente, os principais problemas que têm de ser resolvidos de maneira a que o equipamento se conforme com o novo paradigma são:

- Fraca monitorização dos dados relevantes ao processo de funcionamento;
- Baixa variedade de ciclos de trabalho possíveis;
- Incapacidade de gravar dados de funcionamento;
- Incapacidade de acesso remoto aos dados monitorizados;
- Componentes obsoletos com funcionamento defeituoso;
- Inconformidade com a certificação CE.

3.3 Retrofitting da Prensa

3.3.1 Requisitos Técnicos

Após discussão com os elementos da UMEC, de maneira a alcançar os requisitos de funcionamento necessários para a realização de testes e permitir a integração da prensa numa rede adequada aos conceitos da I4.0, foram definidos os seguintes objetivos:

- Monitorização do campo de temperaturas e da distribuição da força espacial aplicada em cada prato;
- Capacidade de armazenar um histórico local dos ciclos realizados;
- Inclusão de uma interface gráfica intuitiva;
- Acessibilidade remota através da arquitetura de comunicação OPC-UA;
- Permitir a inclusão de medidas de controlo e supervisão avançadas, nomeadamente, computação distribuída, *digital twin*, manutenção preditiva e *machine learning*⁸.
- Monitorização e controlo da força exercida pela prensa diretamente nos pratos, em vez de realizar esse controlo indiretamente, através da pressão na linha de óleo ligada à câmara inferior do cilindro;
- Capacidade de definir ciclos de força ou espessura em conjunto com a temperatura, podendo estes ser programados com um alto nível de flexibilidade;
- Limitar a força aplicável nos pratos a 250 kN;
- Controlo de temperatura, quer no aquecimento ou arrefecimento, com uma taxa de variação de 1 a 3 °C/min;
- Capacidade de alcançar uma temperatura máxima nos pratos de 350°C com um único fluído térmico;
- Atualizar a prensa com componentes de segurança que obedeçam às normas de segurança atuais.

Os primeiros 5 requisitos são os essenciais para a prensa poder ser considerada como estando adaptada aos requisitos da indústria 4.0. Controlo flexível, com aquisição de um número elevado de dados, facilidade de uso e partilha destes dados. A utilização da arquitetura de comunicação OPC-UA foi escolhida não só por ser uma arquitetura fiável, segura e em uso comum na comunicação entre máquinas, mas também para uniformizar a estrutura de comunicação entre os equipamentos da UMEC.

Dado as insuficiências descritas no capítulo anterior referentes ao controlo das variáveis do processo, este controlo será alterado de maneira significativa.

O controlo de força não será realizado indiretamente através de um transdutor de pressão, mas sim por um conjunto de 4 células de carga acopladas ao prato inferior. Assim, o requisito de limitar a prensa a 250 kN apesar de esta ter a capacidade de 400kN, advém do facto de não só não se utilizar níveis de força tão altos atualmente, mas também para criar uma confortável margem de segurança para as células de carga, tendo estas um limite de 250 kN. Ainda assim, sendo a carga distribuída pelas quatro células uniformemente, esta poderia ir a um máximo de

⁸ *Machine learning*: algoritmos que, através de uma análise automática e recorrente, são capazes aprendizagem e de otimizar automaticamente uma dada tarefa.

1000kN. As 4 células de carga permitirão, através da sua construção, compensar alguns dos desvios que o prato inferior possa ter, permitindo alcançar uma distribuição de força mais uniforme.

Quanto ao controlo de temperatura, este passará a ser realizado através de um único fluído térmico, controlado por uma unidade termorreguladora, realizando o arrefecimento e o aquecimento. Os sistemas de aquecimento e arrefecimento passarão então a ser incorporados num único sistema de controlo de temperatura. Isto permitirá um maior controlo das taxas de variação e uma maior flexibilidade na definição dos ciclos de temperatura. Os cálculos necessários para garantir que estas estejam dentro da gama de 1 a 3 °C/min foram realizados previamente à aquisição do equipamento. Apesar de atualmente a prensa ser capaz de alcançar os 400°C utilizando as resistências de aquecimento, com o novo sistema esta temperatura estará limitada a 350°C. Isto por não haver necessidade corrente de alcançar temperaturas superiores. Ainda assim, as resistências de aquecimento não serão retiradas da prensa, mantendo a possibilidade de, no futuro, se adaptar o sistema para usar o termorregulador e as resistências em conjunto, aumentando a gama de temperaturas de operação para o seu estado original.

3.3.2 Arquitetura de Controlo a Implementar

A Figura 26 representa a nova relação hierárquica entre os diferentes sistemas de controlo, estando o PLC e a HMI no centro do comando. De notar que este diagrama é de extrema importância, pois servirá de base a todo o planeamento inerente ao projeto de *retrofitting* da prensa em estudo.

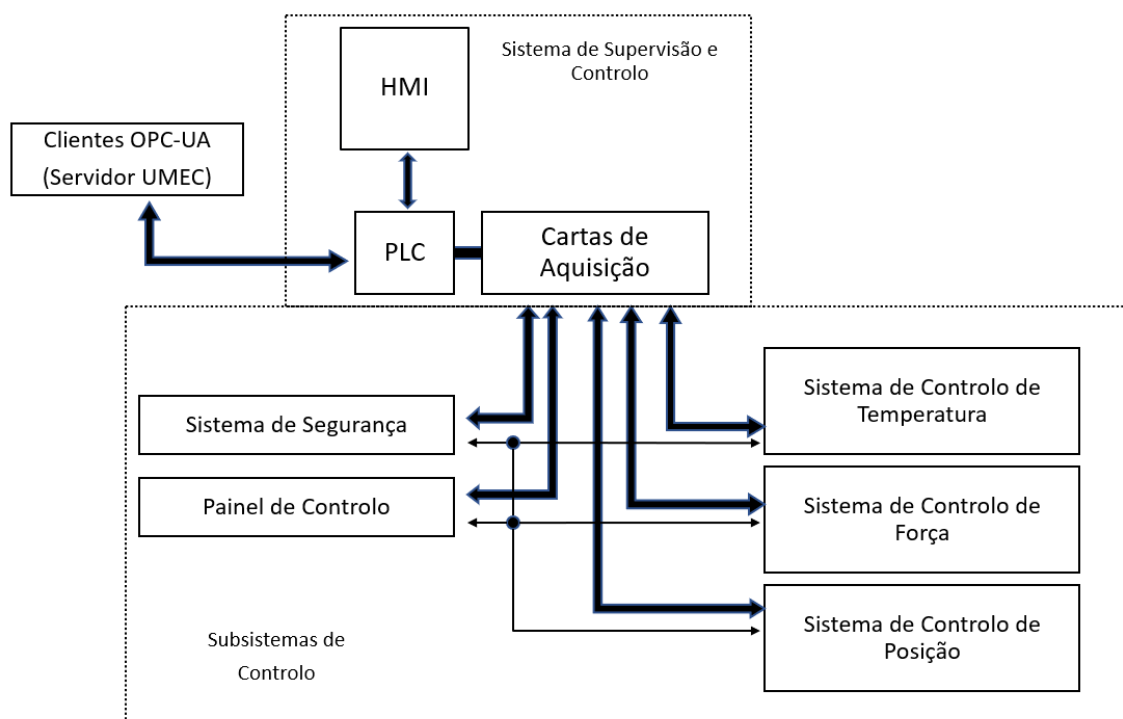


Figura 26 – Relação hierárquica entre os diferentes sistemas de controlo

No capítulo 4 serão detalhados os subsistemas da prensa hidráulica, enumerando as suas relações e caracterizando a sua composição. O mesmo será feito no capítulo 5 para o sistema de controlo e supervisão, sendo mostrada a sua composição, capacidades e lógica de controlo

4 Subsistemas da Prensa Hidráulica

4.1 Sistema de Controlo de Temperatura

4.1.1 Descrição de Funcionamento

Foram propostos dois sistemas de controlo de temperatura, um de maior complexidade e flexibilidade e outro mais simples e direto, capaz de ser implementado, se desejado, independentemente dos restantes sistemas.

No sistema mais complexo, representado na Figura 27, a unidade termorreguladora realizará o controlo da temperatura do óleo dentro de um tanque de expansão. Este óleo será então direcionado para os pratos de maneira independente através de duas bombas. Estas bombas, em conjunto com o PLC e variadores de frequência, fornecerão diferentes quantidades de fluido térmico a cada prato, controlando independentemente a sua temperatura.

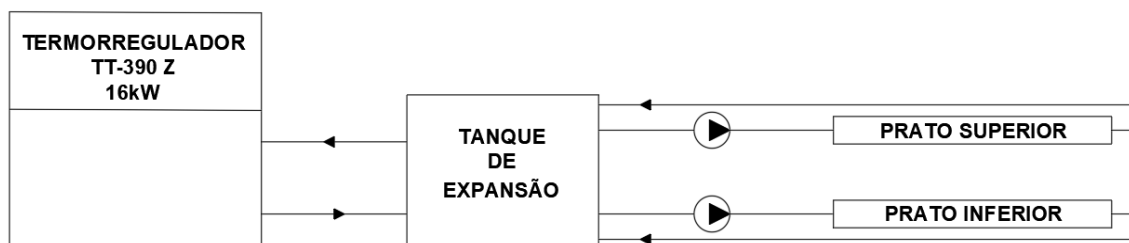


Figura 27 – Modelo do sistema mais complexo de controlo de temperatura

No modelo mais simples, a alimentação do fluido térmico será realizada diretamente do termorregulador para os pratos, como se pode ver na Figura 28, sendo o controlo de temperatura realizado pelo controlador do termorregulador. Este sistema, apesar de não tão flexível e de apresentar um controlo de temperatura não independente, ganha pela sua simplicidade, sendo possível extrair deste uma maior eficiência energética. O termorregulador, em ambos os sistemas, recebe a referência de temperatura do PLC.

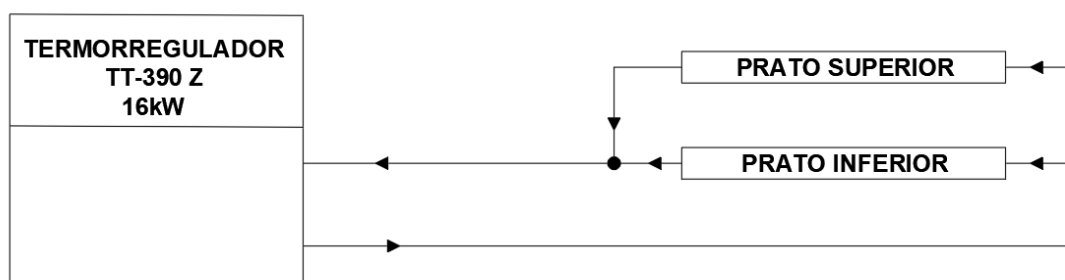


Figura 28 – Modelo do sistema mais simples de controlo de temperatura

O sistema de controlo direto, mais simples, devido à diferença de cotas dos pratos, traz consigo o problema de que o fluído tenderá a fluir para o prato inferior. Para colmatar este efeito, será garantido que todas as mangueiras terão comprimentos iguais e que os coletores se encontram à mesma cota. É também esperado que, como pelo efeito de convecção o prato superior receberá calor do prato inferior, as diferenças de temperatura entre os pratos sejam diminutas.

É de notar que as resistências de aquecimento pertencentes ao sistema original não serão removidas. Tendo estas a capacidade de aquecer os pratos até 400 °C, como mostrado na Figura 24, e o novo sistema apenas ter a capacidade de chegar aos 350 °C, um futuro sistema, que inclua ambos os métodos de aquecimento, poderá ser realizado para manter a gama de temperaturas de trabalho elevada.

Para a unidade da UMEC, a instalação do sistema de controlo de temperatura complexo será o objetivo final. Apesar disso, dado o tempo útil desta dissertação e a disponibilidade reduzida da prensa para a realização de testes de controladores, foi decidido que a alteração deste sistema será realizada de forma escalonada, começando, numa primeira fase, com o sistema simples. Posteriormente, numa segunda fase, será instalado o sistema completo, atingindo assim o objetivo final da unidade.

No âmbito desta dissertação ter-se-á como objetivo a instalação do sistema simples, sendo que, em termos de comando de alto nível, o sistema de controlo será preparado para que, aquando a instalação do sistema completo, a transição seja o mais simples possível. Assim, todos os elementos que integrarão os dois sistemas são descritos nas secções seguintes.

4.1.2 Equipamentos e Componentes integrados

Os principais componentes do novo sistema de controlo de temperatura estão mostrados na Tabela 18, sendo estes o termorregulador, para a primeira fase de implementação, as bombas centrífugas com os variadores de frequência, o tanque e os termopares, fazendo estes partes da segunda fase de implementação, ou seja do sistema mais completo.

Tabela 18 – Equipamentos adquiridos para o sistema de controlo de temperatura

Equipamento	Imagem	Descrição
Termorregulador		Novo termorregulador TT-390 com controlador de temperatura MP-888. Este termorregulador junta os sistemas de aquecimento e arrefecimento num único sistema.
Tanque		Um novo tanque, capaz de suportar as novas temperaturas
2 x Bomba + Variador de Frequência		Dois conjuntos de bombas controladas por variadores de frequência que permitirão o controlo da quantidade de fluído térmico que é fornecido a cada prato.
Termopares		Conjunto de Termopares tipo K, sendo que cada prato será instrumentado com 5. Serão também instalados termopares nas linhas de alimentação de fluído térmico.

Termorregulador TT-390 Z

A Tabela 19 descreve as características técnicas e físicas do termorregulador TT-390 Z da TOOL-TEMP, com controlador de temperatura MP-888.

Tabela 19 – Características técnicas do termorregulador TT-390 Z

Característica		Unid.	Descrição
Potência de Aquecimento		kW	16
Potência de Arrefecimento		kW	máx. 90
Gama de Temperaturas		°C	50 - 360
Bomba	Potência do Motor	kW	1.8
	Modo de Pressão	bar / L/min	máx. 5,5 / 100
	Modo de Vácuo	mH ₂ O	8
	Tipo	---	Bomba com vedante axial e sistema de rolamentos triplo
Tanque Interno	Capacidade	L	15
	Volume de Expansão	L	16
Óleo TOOL-THERM SH-3	Tipo	---	Mineral
	Gama de temperatura	°C	20 - 360
	Solubilidade em água	---	Difícil
	Categoria Tóxica	---	Nenhuma
Alimentação			3 x 380...415V 50Hz
Dimensões	Altura	mm	1400
	Largura	mm	480
	Comprimento	mm	1240
	Peso (vazio)	kgf	205

Na Figura 29, podemos observar a capacidade da bomba integrada no termorregulador e na Figura 30, a variação da potência de arrefecimento com a temperatura do fluido, ambos retirados da ficha técnica do equipamento.

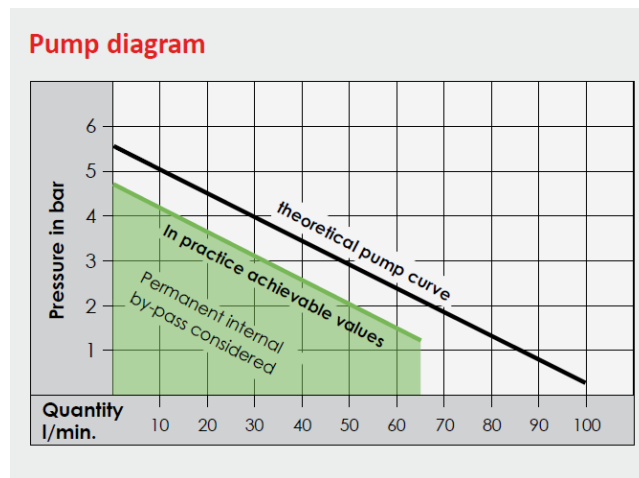


Figura 29 – Relação caudal-pressão da bomba integrada no termorregulador

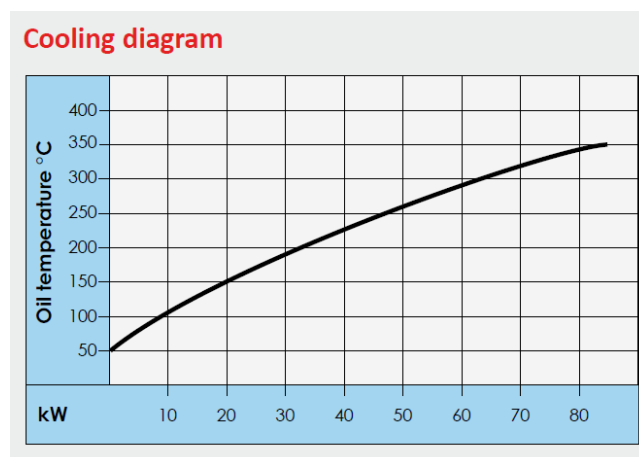


Figura 30 – Variação da potência de arrefecimento com a temperatura do fluido térmico

O controlador MP-888 tem uma série de interfaces que lhe permitem comunicar com equipamentos exteriores. No nosso caso, estes equipamentos serão o PLC. Estas interfaces estão representadas na Figura 31 e Tabela 20

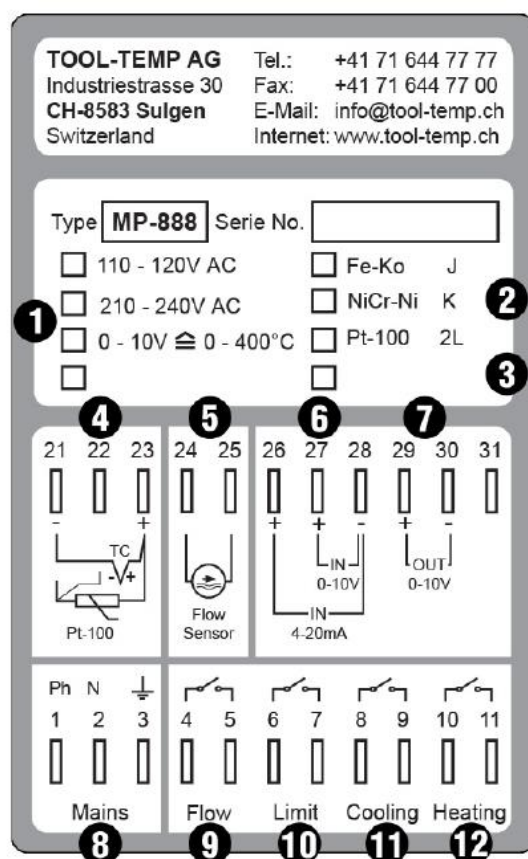


Figura 31 – Pannel de ligações ao controlador MP-888

Tabela 20 – Descrição do pannel de ligações ao controlador MP-888

Nº	Descrição
1	Tensão de Alimentação
2	Sensores de Temperatura internos
3	Versão do Software
4	21 – 23 Ligação a Termopar Exterior 22 Compensação PT-100
5	Caudal interno do termorregulador
6	Ligação a <i>set point</i> exterior 26 – 28 Input Analógico 4-20 mA 27 – 28 Input Analógico 0-10 V
7	Sinal de Temperatura do Fluido 0-10 V
8	Entrada da Alimentação Elétrica
9	Sinal de alarme para excesso de caudal
10	Sinal de alarme para desvio de temperatura
11	Sinal que indica o arrefecimento do fluido
12	Sinal que indica o aquecimento do fluido

Termopares tipo K

Ambos os sistemas de controlo de temperatura farão uso de um conjunto de termopares tipo K para realizar, em conjunto com o PLC, a monitorização do estado do sistema.

Serão colocados um termopar em cada linha de alimentação de fluído térmico, antes de o fluído entrar nos pratos e, no sistema que usará as bombas de linha, depois destas. Nos pratos, como mostra a Figura 32, serão instalados 5 termopares em cada um. O controlo de temperatura usará o termopar central como referência, sendo que os restantes termopares, quer os nos pratos ou nas linhas de óleo, serão instalados para fornecerem uma imagem mais compreensiva do processo a ser aplicado e da situação de prensa hidráulica. Como especificado no capítulo 2.2, um dos pontos da indústria 4.0 é o fornecimento de uma elevada quantidade de informação.

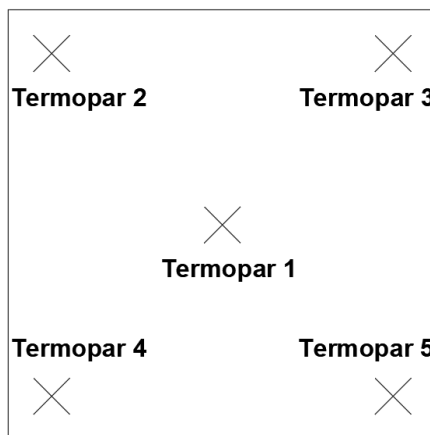


Figura 32 – Localização dos termopares em cada prato

Conjunto de Bombas de Linha mais Variador de Frequência

No sistema completo, temos, para cada linha, um conjunto bomba mais variador de frequência, modelo LQWY26-20-100, fornecidas pela YonJou. As características destas bombas e dos seus motores encontram-se na Tabela 21 e Tabela 22, respetivamente, enquanto que na Figura 33 se podem observar as suas curvas descritivas.

Tabela 21 – Características das bombas das linhas de alimentação de fluído térmico

Característica			Unid.	Valor
Bomba	Caudal	Nominal	m ³ /h	4,5
		Máximo	m ³ /h	5,67
	Altura Manométrica	Nominal	m	15
		Máxima	m	16,8
		Mínima	m	13
	Diâmetro Entrada/Saída		mm	26/20
	NPSH		m	0,8
	Potência		kW	0,43
	Rendimento		%	40
	Viscosidade Permitida		cSt	<10
	Velocidade Nominal		rpm	2900

Tabela 22 – Características dos motores das bombas das linhas de alimentação de fluido térmico

Característica			Unid.	Valor
Motor	Potência		kW	0,75
	Rendimento		%	75
	Velocidade Nominal		rpm	2900
	Alimentação Elétrica	Corrente	A	1,68
		Tensão	V	3 x 380...415, 50Hz
Input do Variador de Frequência			mA	4...20

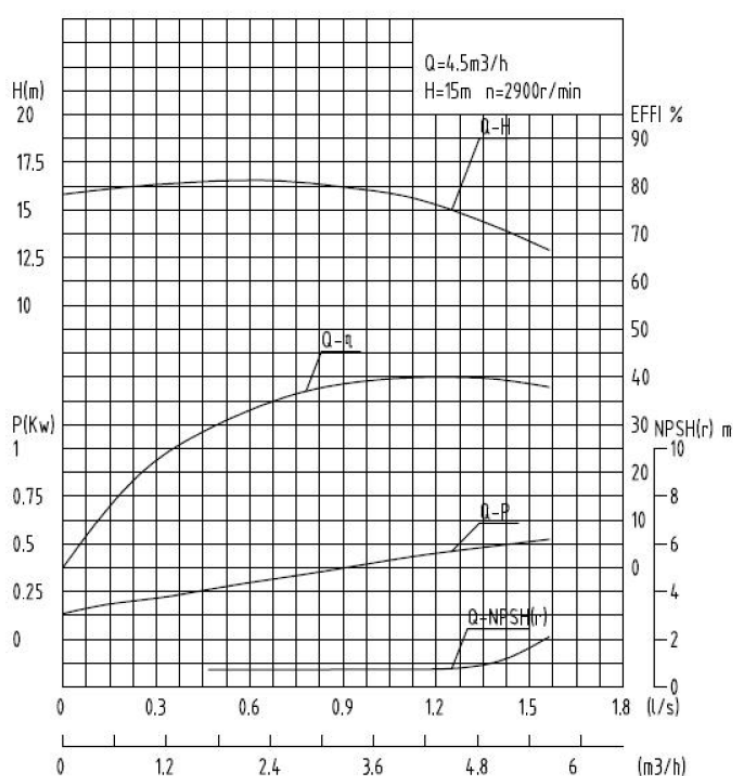


Figura 33 – Curvas características do conjunto bomba/motor das linhas de alimentação de fluido térmico

4.1.3 Projeto Hidráulico

Independentemente do sistema usado, como indicado pelo fabricante, todas as tubagens têm de aguentar pressões até 20 bar e temperaturas até 400 °C.

Para o sistema simples, o que irá ser implementado, o diagrama hidráulico está representado na Figura 34.

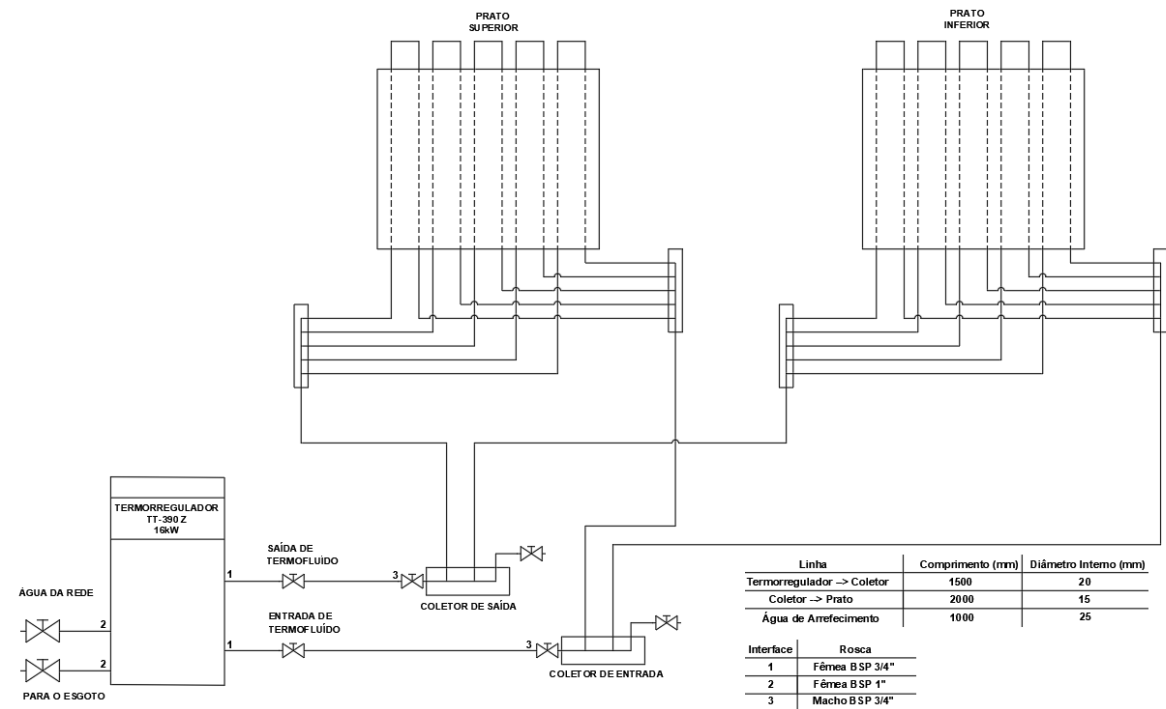


Figura 34 – Diagrama Hidráulico do sistema de controle de temperatura direto

O sistema completo encontra-se representado no diagrama da Figura 35.

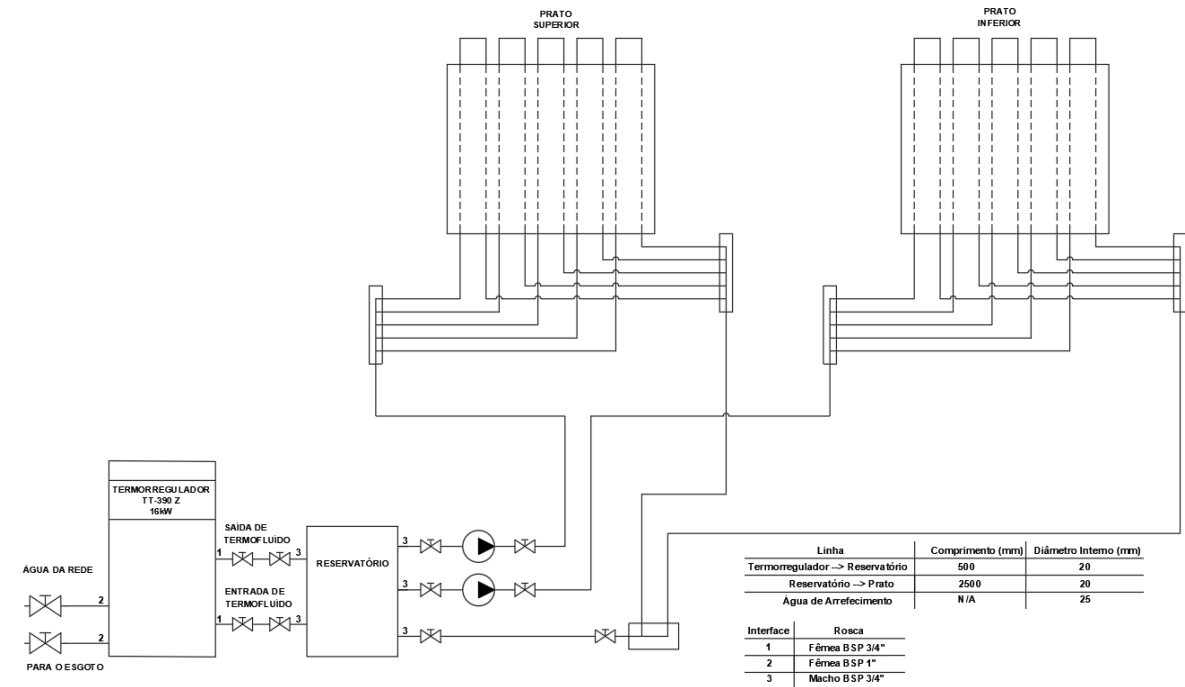


Figura 35 – Diagrama hidráulico para o sistema com controle individual da temperatura de cada prato

4.1.4 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema

O subsistema de controlo de temperatura pode então ser resumido no diagrama da Figura 36, representando as setas os dados trocados entre este e o sistema de controlo e supervisão. As linhas a tracejado representam os dados trocados somente com o sistema que inclui as bombas de linha e o reservatório. A legenda destas encontra-se na Tabela 23.

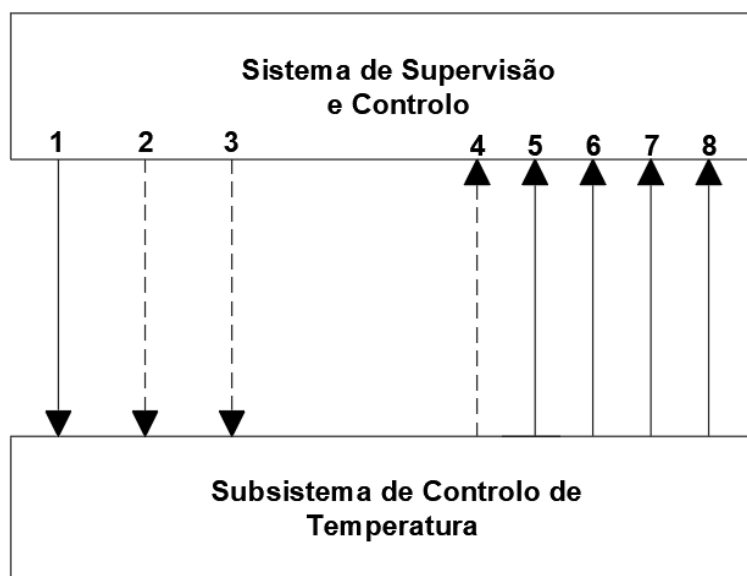


Figura 36 – Diagrama representativo da interação entre o sistema de controlo e supervisão e o subsistema de controlo de temperatura.

Tabela 23 – Descrição dos dados trocados pelo subsistema de controlo de temperatura

Nº	Tipo	Variável	Designação no Programa de Controlo	Atributo
1	Input	Referência de temperatura para o termorregulador	Ref_Temp	4...20 mA (0...400 °C)
2	Input	Referência de caudal para a bomba de linha inferior	Ref_Caudal_Inf	4...20 mA (0...5,67 m³/h)
3	Input	Referência de caudal para a bomba de linha superior	Ref_Caudal_Sup	4...20 mA (0...5,67 m³/h)
4	Output	Temperatura do Reservatório	M_Temp_SA_R	Termopar tipo K
5	Output	2 x Temperatura da linha de alimentação inf/sup	M_Temp_SA_L[I/S]	Termopar tipo K
6	Output	Temperatura atual no termorregulador	M_Temp_SA_T	0...10 V (0...400 °C)
7	Output	5 x temperaturas do prato inferior	M_Temp_PI_[1...5]	Termopar tipo K
8	Output	5 x temperaturas do prato superior	M_Temp_PS_[1...5]	Termopar tipo K

4.2 Sistema de Controlo da Força

4.2.1 Descrição do Funcionamento

A base do sistema de controlo de pressão manter-se-á a mesma. Quer isto dizer que não serão feitas alterações ao conjunto hidráulico de alta pressão. O esquema da Figura 37 representa o funcionamento do sistema de controlo original, mostrando a inexistência de *feedback* no controlo da força exercida no prato inferior, sendo que este apenas controla a pressão gerada no conjunto hidráulico.

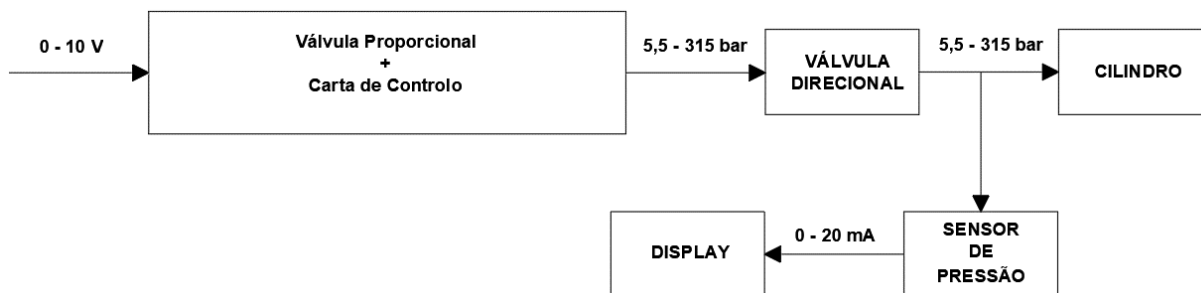


Figura 37 – Diagrama de blocos representativo do sistema de controlo de pressão

O novo sistema incorporará a válvula proporcional bem como a sua carta de controlo original, tal como o sensor de pressão presente. Será acrescentado um outro transdutor de pressão, mais próximo do cilindro, de maneira a garantir uma melhor medição da pressão no sistema, visto o transdutor original se encontrar numa zona de circulação de fluido instável, e de maneira a aumentar os pontos monitorizados. Além disso, serão adicionadas 4 células de carga, capazes de medir a força exercida pelo cilindro diretamente nos pratos, sendo estes dados os que irão fechar a malha de controlo com o PLC, ficando o sistema com *feedback* direto do que está a acontecer nestes. O diagrama da Figura 38 representa este novo sistema.

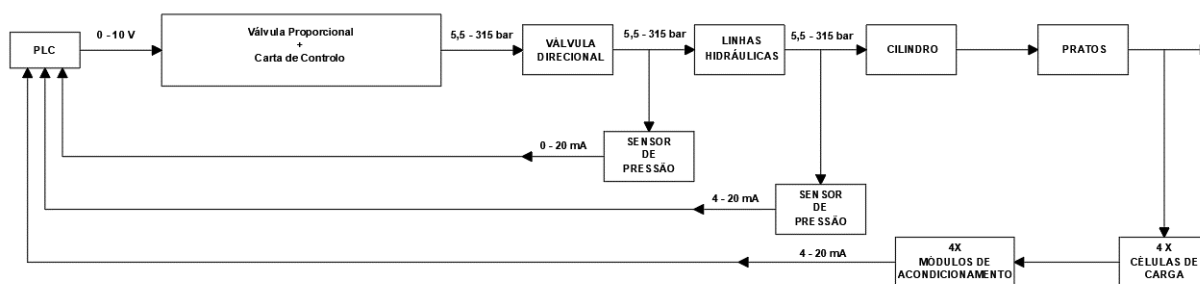


Figura 38 – Diagrama de blocos representativo do novo sistema de controlo de força

4.2.2 Equipamentos e Componentes integrados

Os principais componentes deste sistema, excluindo o PLC, são então as células de carga e os equipamentos que condicionam os seus sinais. O sensor de pressão será instalado não com propósito de ser um elemento da linha de controlo principal, mas simplesmente para ser mais um ponto de monitorização. Cada célula de carga será equipada com um termopar tipo K, de forma a garantir que estas se mantêm dentro da gama de temperaturas de operação. Estes elementos estão sumariados na Tabela 24.

Tabela 24 – Equipamentos adquiridos para o sistema de controlo de pressão/força

Equipamento	Imagem	Descrição
Células de Carga		Células de carga com a capacidade de medição até 25kN. Um conjunto de 4 permitirá avaliar a distribuição espacial da força aplicada ao prato.
Módulos de Condicionamento de Sinal		Módulos de condicionamento que transformam o sinal produzido pelas células de carga num sinal capaz de ser interpretado pelo PLC.
Sensor de Pressão		Sensor de pressão PT5500 da IFM a ser colocado próximo do cilindro.
Termopares tipo K		Conjunto de termopares tipo K com o objetivo não de controlar o processo, mas de assegurar que alguns dos equipamentos mais sensíveis se mantenham em segurança.

As especificações técnicas destes equipamentos, podem ser encontradas na Tabela 25 e Tabela 26.

Tabela 25 – Características técnicas das células de carga CPA-25-D, dos respetivos módulos de acondicionamento de sinal SGA e outros equipamentos

Característica		Unid.	Valor
Células de Carga	Carga	Nominal	daN
		Máxima	daN
		Rotura	daN
	Não-Linearidade		daN
	Não-repetibilidade		daN
	Tensão de Excitação		V
	Output		mV
	Gama de Temperatura de Operação		°C
	Gama de Temperatura de Operação Compensada		°C

Tabela 26 – Continuação da Tabela 25

Característica		Unid.	Valor
Módulo de Condicionamento	Gama de Outputs	V	+/- 10
			+/- 5
			0...10
			0...5
		mA	0...20
			4...20
	Gama de Temperaturas de Operação	°C	-10...50
	Alimentação Elétrica	V	110/230 AC
18-24 DC			
Transdutor de Pressão Original		mA	0...20
		bar	0...400
Transdutor de pressão PT5500		mA	4...20
		bar	0...400
Termopares		---	Tipo K

4.2.3 Projeto Mecânico

As células de carga por si só não são compatíveis com a prensa. Quer isto dizer que não existe um modo “natural” de as integrar com o prato inferior. Estas são compostas por um corpo principal e por uma cabeça que funciona como rótula, conseguindo assim compensar desalinhamentos na face de fixação. O uso de um sistema de rótulas simplesmente pousadas na célula de carga obrigou a que estas fossem colocadas no prato inferior, possivelmente dificultando a cablagem necessária, mas, tendo em conta que o curso percorrido pelo prato é de baixas dimensões e que o custo de um sistema de rótulas invertidas seria elevado, optou-se por instrumentar o prato inferior. Estas considerações foram discutidas e a conclusão aceite com os outros membros da unidade.

Para realizar esta fixação, houve a necessidade de criar suportes, sendo esta criação realizada em conjunto com o Eng. Fernando Silva. Os modelos 3D dos componentes de fixação foram criados no software SolidWorks, estando o conjunto representado na Figura 39, e a sua legenda na Tabela 27.

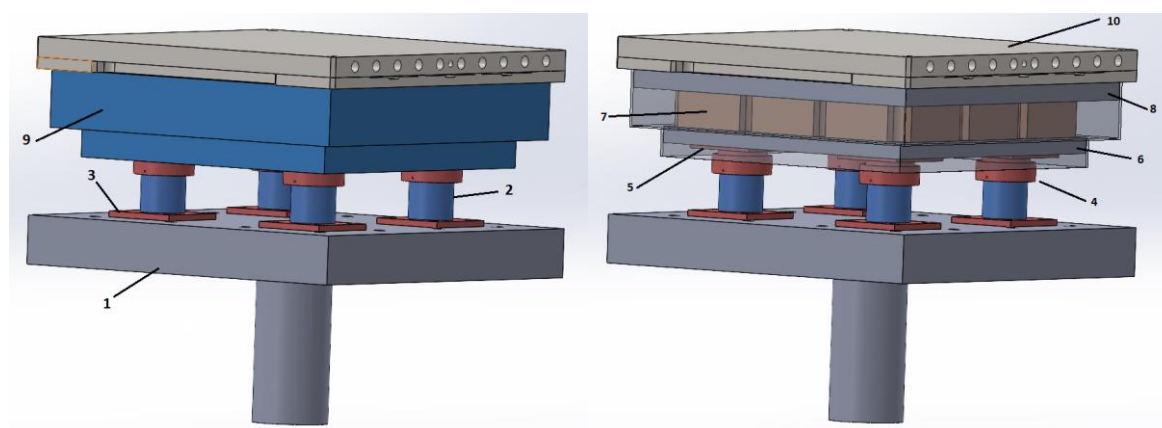


Figura 39 – Modelo 3D das células de carga e a sua fixação aos pratos. A imagem da direita mostra o conjunto com a proteção do material de isolamento transparente para melhor visualização do conjunto.

Tabela 27 – Legenda da Figura 39

Nº	Nome	Nº	Nome
1	Prato principal da prensa	6	Prato de suporte inferior
2	Célula de carga	7	Material isolante refratário
3	Base de fixação da célula	8	Prato de suporte superior
4	Suporte para o arrefecimento	9	Barreira de proteção do material refratário
5	Base para a fixação da cabeça da célula	10	Prato de aquecimento e arrefecimento

Na Figura 40 vemos os novos componentes, em maior detalhe, que serão usados na fixação das células de carga.

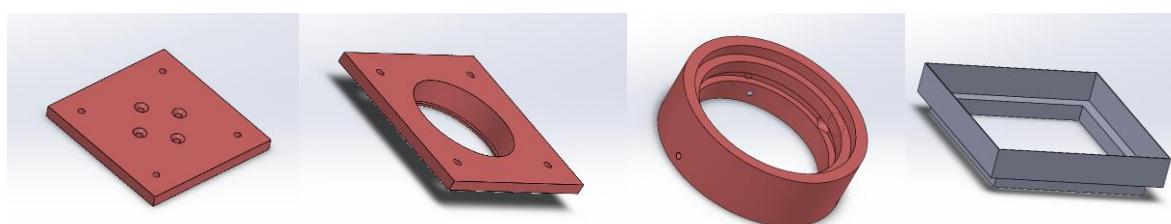


Figura 40 – Componentes de fixação das células de carga aos pratos. Da esquerda para a direita: base de fixação da célula; base de fixação da cabeça da célula; suporte para o arrefecimento das células; proteção do material de isolamento.

Ambas as bases, do corpo e da cabeça da célula, têm a função óbvia de a manter no lugar. O suporte para o arrefecimento advém da necessidade de manter as células dentro da sua temperatura de operação. Assim, se, através do termopar acoplado à célula, o sistema de controlo detetar que a temperatura subiu acima dos níveis permitidos, pode comandar uma válvula de maneira a direcionar ar pressurizado (proveniente da rede de ar do INEGI) para as células. Este suporte mantém as mangueiras de ar corretamente posicionadas. Os correspondentes desenhos técnicos podem ser vistos no Anexo A.

4.2.4 Variáveis de Entrada e Saída do Subsistema

O subsistema de controlo de força pode então ser resumido no diagrama da Figura 41, representando as setas os dados trocados entre este e o sistema de controlo e supervisão. A legenda destas encontra-se na Tabela 28.

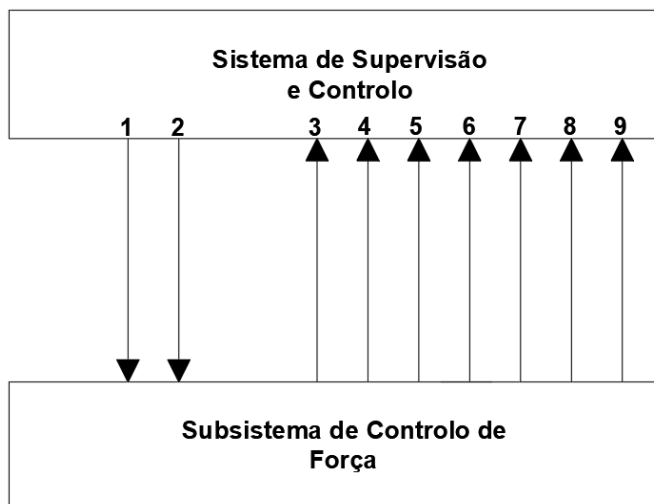


Figura 41 – Diagrama descritivo da interação entre o subsistema de controlo de força e o sistema de supervisão e controlo

Tabela 28 – Legenda dos dados trocados entre o subsistema de controlo de força e o sistema de supervisão e controlo

Nº	Tipo	Variável	Designação no Programa de Controlo	Atributo
1	Input	Referência de Pressão	Ref_Pressão	0...10 V (0...315 bar)
2	Input	Comando de ativação do arrefecimento das células	Ligar_Ar_Arrefecimento	Digital
3	Output	Leitura de pressão à saída do grupo hidráulico de alta pressão	M_P_Válvula	0...20 mA (0...400 bar)
4	Output	Leitura de pressão na linha	M_P_Linha	4...20 mA (0...400 bar)
5	Output	Sinal da Célula de Carga 1	M_CC_1	4...20 mA (0...250 kN)
6	Output	Sinal da Célula de Carga 2	M_CC_2	4...20 mA (0...250 kN)
7	Output	Sinal da Célula de Carga 3	M_CC_3	4...20 mA (0...250 kN)
8	Output	Sinal da Célula de Carga 4	M_CC_4	4...20 mA (0...250 kN)
9	Output	Temp, da Célula de Carga	M_Temp_CC_[1...4]	Termopar tipo K

4.3 Sistema de Controlo de Deslocamento do Prato Inferior

4.3.1 Descrição do Funcionamento

O sistema de controlo de posição baseia-se na simples inclusão de um sensor de deslocamento emparelhado com o cilindro e fornecendo *feedback* ao PLC. Assim, usando a válvula proporcional em conjunto com o comando da válvula direcional, o PLC poderá controlar a posição do prato inferior. O esquema da Figura 42 resume o funcionamento do sistema.

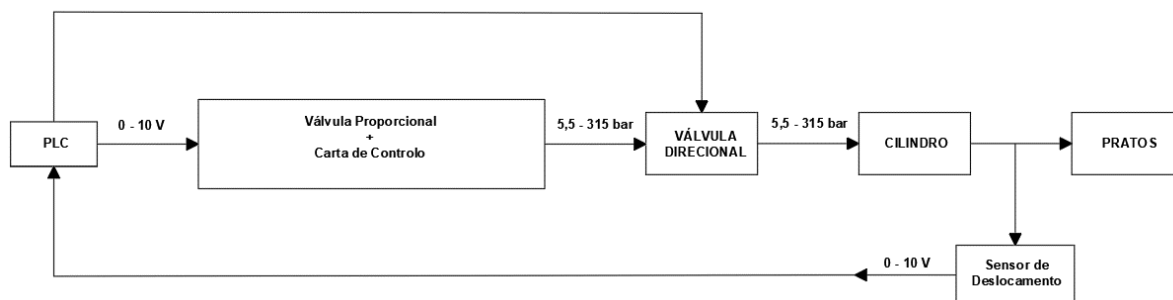


Figura 42 – Diagrama a exemplificar o funcionamento do sistema de controlo de deslocamento

Idealmente, o PLC seria capaz de comandar a pressão imposta pela válvula proporcional para variar a velocidade do prato, mas, realizando um teste onde se desconectou a válvula proporcional do seu módulo de controlo, foi verificado que a pressão mínima aplicada pela central hidráulica rondava os 15 bar. Esta pressão mínima dá azo a um valor mínimo de velocidade de deslocamento, não nulo. Assim, a variação da pressão não poderá ser usada para parar o cilindro, tendo essa tarefa de ser realizada pela válvula direcional. Devido a estas limitações, a solução inicialmente prevista foi substituída por um controlador *on/off*, descrito com mais pormenor na secção 7.3. Futuramente, e realizando as alterações necessárias à central hidráulica, esta solução de controlo fino da posição poderá ser implementada.

4.3.2 Equipamentos e Componentes Integrados

O sensor de deslocamento é o modelo MPT500 da MOULDPRO, um transdutor potenciométrico linear, alimentado a 10V DC através de uma fonte de 24V (descrita no capítulo 5.1) e um conversor DC-DC de 24V para 10V WAGO 787-2802, Figura 43. As suas características técnicas encontram-se na Tabela 29.

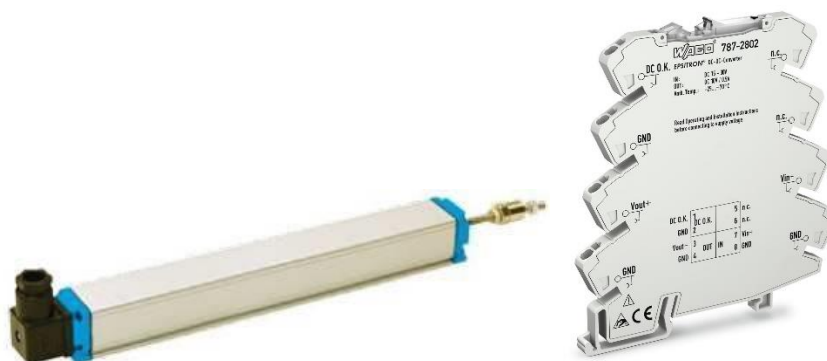


Figura 43 – Transdutor potenciométrico linear MPT500 (esquerda) e conversor DC-DC WAGO 787-2802 (direita)

Tabela 29 – Características técnicas do transdutor de posição potenciométrico

Característica		Unid.	Valor
Curso	Útil	mm	400
	Total	mm	403
Tensão Máxima Aplicável		V	28 DC
Resistência		Ohm	5000
Velocidade máxima		m/s	<5
Gama de Temperaturas de Operação		°C	-20...80

4.3.3 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema

O subsistema de controlo de posição pode então ser resumido no diagrama da, Figura 44 representando as setas os dados trocados entre este e o sistema de controlo e supervisão. A legenda destas encontra-se na Tabela 30.

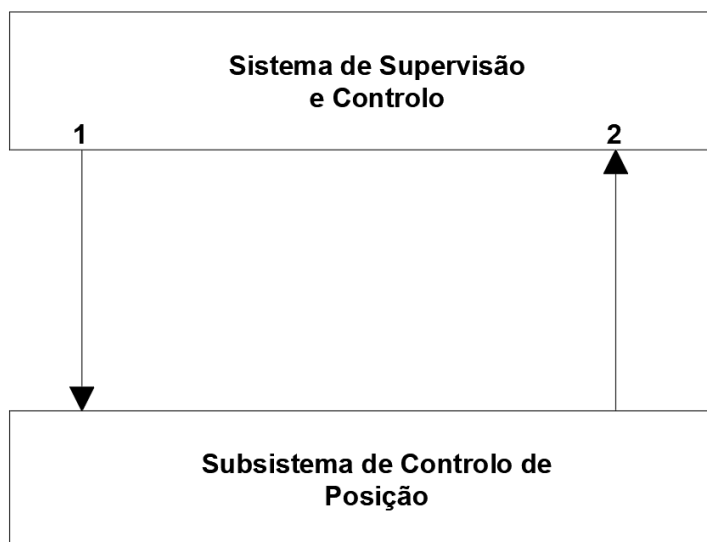


Figura 44 – Diagrama descritivo da interação entre o subsistema de controlo de posição e o sistema de supervisão e controlo

Tabela 30 – Legenda dos dados trocados entre o subsistema de controlo de posição e o sistema de supervisão e controlo

Nº	Tipo	Variável	Designação no Programa de Controlo	Unid.	Atributo
1	Input	Controlo da Válvula Direcional	Fechar_Prato / Abrir Prato	---	Digital
2	Output	Posição do Cilindro	M_D	V mm	0...10 (0...400)

4.4 Sistema de Segurança

4.4.1 Descrição de Funcionamento

Idealmente, seria realizado uma análise de risco, de acordo com a norma EN ISO 12100: 2018, e mais especificamente seguindo a norma relativa à projeção de prensas hidráulicas EN693, ao estado atual do equipamento e, assim, definidos os requisitos para que esta se encontrasse em conformidade com as normas e legislações atuais. Devido à extensão desse trabalho e ao tempo disponível para a realização da dissertação, tal avaliação não foi realizada, sendo que todos os componentes e alterações à prensa, destinadas a funções de segurança, foram escolhidos com a consciência da sua conformidade com as normas e com o sobredimensionamento dos seus índices de performance para além da supervisão e experiência dos elementos da equipa responsável pelo equipamento.

O sistema de segurança comunica, mas não é controlado pelo sistema de supervisão e controlo. O único elemento deste sistema que será controlado pelo PLC será a torre de sinalização, o seu comportamento respeitando a norma IEC 60204-1 – Apt. 10.3.

Este novo sistema será composto por duas partes: uma constituída por barreiras físicas e outra por elementos eletromecânicos de segurança.

Barreiras Físicas

Estas barreiras, de acordo com a norma EN ISO 14120: 2016, limitarão o acesso às áreas que contenham potenciais perigos e a que o seu acesso não seja necessário para a operação da prensa. Ou seja, barrarão o acesso à central hidráulica de alta pressão e à zona onde se colocará o termorregulador e, eventualmente, o reservatório e as bombas de linha. Estas não serão fixas, sendo possível a sua abertura, que será detetada através de um sensor magnético codificado, sensor esse com concordância com a norma EN ISO 14119: 2013 e IEC 60947, pelo PLC e, no caso desta ocorrer durante a operação da prensa, pelo módulo de segurança. Será também instalado nesta zona uma botoneira de emergência. O esquema da Figura 45 mostra a disposição destas barreiras, representadas pelas linhas a tracejado.

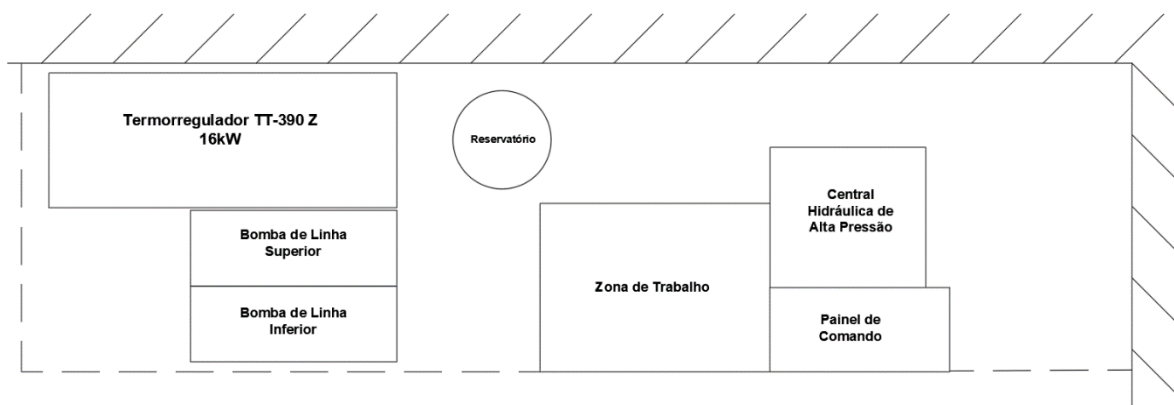


Figura 45 – Esquematização da localização das barreiras físicas

Para além disso, e como se pode ver pela Figura 15, a haste do cilindro e a base inferior do prato principal da prensa encontram-se expostos, sendo, portanto, um elemento de risco e apresentando um perigo significativo para o utilizador. Por isso, e em conjunto com o Eng. Fernando Silva, foi projetada uma barreira que, quando fixada à estrutura da prensa, barrará o acesso accidental a esta zona. Um modelo dessa proteção pode ser visualizado na Figura 46. Esta será fixada à estrutura da prensa.

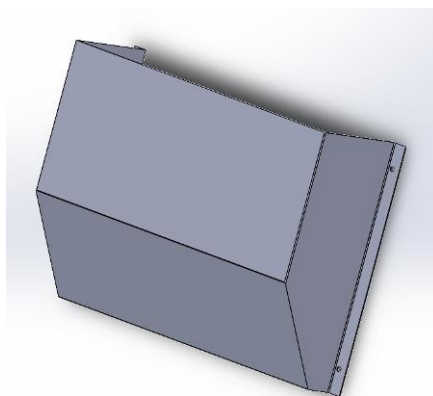


Figura 46 – Modelo em SolidWorks da proteção do cilindro

Elementos Eletromecânicos de Segurança

Na parte de eletrônica de segurança, será instalado um módulo de segurança, dentro da norma ISO 13849-1, que monitorizará a atuação de duas botoneiras de emergência (localizadas na área vedada e no painel de controlo e de acordo com a norma EN ISO 13850), a abertura indevida da porta de acesso aos pratos de trabalho e a abertura do acesso à área vedada. O fecho da porta de acesso aos pratos de trabalho será realizado por um sensor de segurança que, não realizando um bloqueio da abertura da porta, oferece resistência à sua ocorrência.

Aquando da deteção de uma destas ocorrências, o módulo coloca imediatamente a prensa num estado de funcionamento seguro para os operadores, cortando a alimentação elétrica, através de contactores de segurança, à central hidráulica e ao termorregulador, tal como, na eventualidade de serem instaladas, às bombas de linha e às resistências de aquecimento. Só será possível voltar ao modo normal de funcionamento através do rearme da botoneira de emergência, seguido da atuação de uma botoneira de *reset*. Todos os elementos do sistema de segurança funcionam segundo o princípio da ação mecânica positiva, de forma a minimizar a possibilidade de falhas. O sistema de comando Bi-manual original será mantido, para efeitos da subida manual do prato, respeitando este a norma EN 574: 1996. Um novo interruptor de emergência, que cortará completamente a alimentação elétrica à prensa quando atuado, será instalado, estando este de acordo com a norma EN ISO 60204-1.

De forma a ser possível aceder à zona interdita para eventuais atos de manutenção ou introduzir peças na zona de trabalho, sem estar constantemente a ativar o estado de emergência, um novo fim de curso, que indicará que o prato se encontra no seu ponto morto inferior e, assim, que a prensa não se encontra a trabalhar, servirá como *bypass* aos sensores das portas.

Através do uso de um seletor, que apenas poderá ser atuado com o uso de uma chave, não acessível a um utilizador normal, será possível operar a prensa com ambas as portas, quer de acesso aos pratos ou à zona interdita, abertas.

A central hidráulica contém já válvulas limitadoras de pressão, garantindo a segurança desta e o termorregulador contém também sistemas de segurança que garantem que a temperatura do óleo não excede certos limites. Na eventualidade de se alterar o sistema para que permita o uso das resistências de aquecimento, como foi mencionado no subcapítulo 4.1, serão utilizados os controladores de temperatura mostrados na Tabela 15 para garantir a não ultrapassagem dos limites de temperatura nos pratos.

Com o sistema de segurança planeado, ainda persiste um risco residual para o operador, o de ser possível o acesso aos pratos estando estes possivelmente ainda a uma temperatura elevada. Para colmatar este problema, não sendo prático para os operadores o bloqueio total do acesso,

um sinal, como mostrado na Figura 47, será colocado na zona de acesso, de acordo com a norma NP ISO 3864-1:2013 e NP EN ISO 7010:2013.



Figura 47 – Sinal de aviso contra superfícies quentes

Todos estes eventos são comunicados ao PLC, não tendo este a capacidade de atuar ou alterar o comportamento do módulo de segurança. O esquema da Figura 48 representa o funcionamento do sistema de segurança.

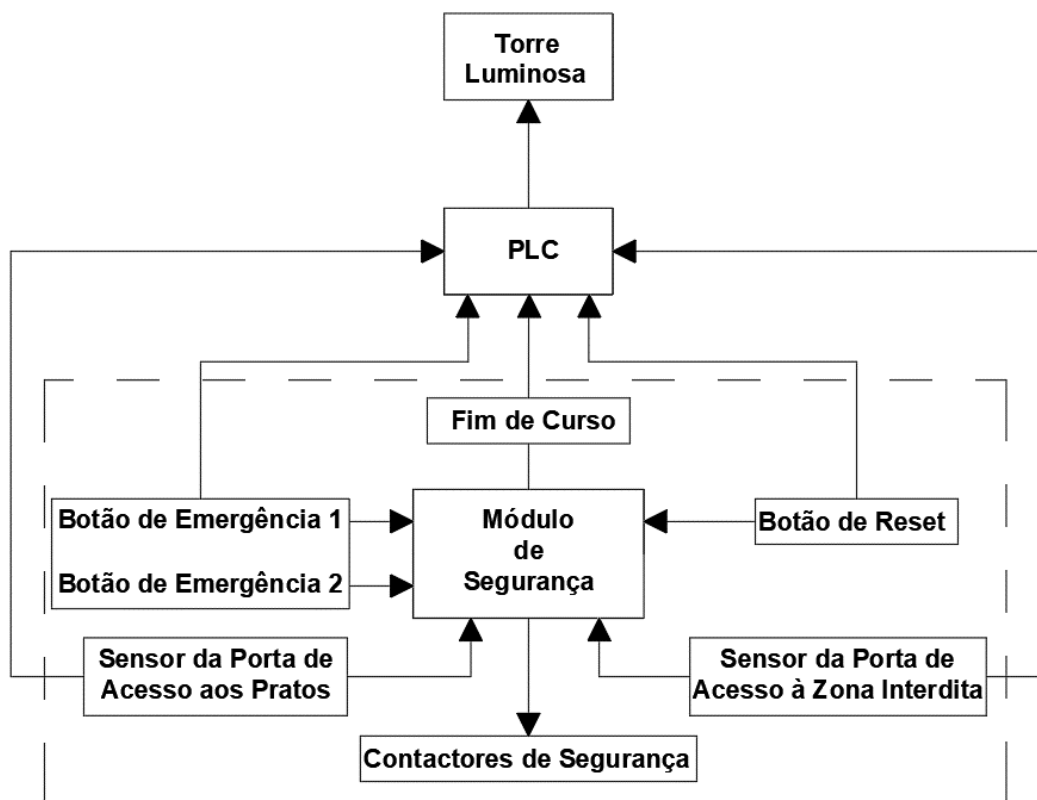


Figura 48 – Diagrama a exemplificar o funcionamento do sistema de segurança

4.4.2 Equipamentos e Componentes Integrados

Os principais componentes eletrónicos de segurança encontram-se na Tabela 31 e as suas características encontram-se na Tabela 32.

Tabela 31 – Equipamentos adquiridos para o sistema de segurança

Equipamento	Imagem	Descrição
Módulo de Segurança		Módulo de segurança “RLY3-EMSS100”, no caso de uma emergência, assegura que os respetivos componentes de perigo são neutralizados.
Contactores de Segurança		Contactos de 4 polos de ação mecânica positiva
Dispositivo de paragem de emergência		Botoneira de emergência com dois contactos NF e um NA.
Interruptor de Emergência		Interruptor de corte ABB S426KN-A
Torre de Sinalização		Uma torre de sinalização com um sinal vermelho, amarelo e verde.
Sensor da Porta de acesso à zona interdita		Sensor magnético codificado IFM MN505S.
Contacto de Segurança da porta de acesso aos pratos		Safety Door Switch OMRON D4NS-4CD.
Fim de Curso		Fim de curso de segurança D4N-4C2H

Tabela 32 – Características técnicas dos principais componentes do sistema de segurança

Característica		Unid.	Valor/Descrição	
Botão de Emergência	Contactos	---	“Rodar” para desengatar	2 x NF 1 x NA
Botão de <i>Reset</i>	Contactos	---	1 NA	
Módulo de Segurança RLY3-EMSS100	Nº Inputs	Segurança	---	2
		<i>Reset</i>	---	1
	Nº Outputs	Segurança	---	2
		Diagnóstico	---	2
		Teste Pulso	---	3
	Gama de Temperatura de Operação		°C	-25...55
	Alimentação Elétrica		V	24 DC
Torre Luminosa	Luzes		---	Vermelho / Amarelo / Verde
	Modos		---	Constante / Intermitente
	Alimentação Elétrica		V	24 DC
	Gama de Temperatura de Operação		°C	-25...55
Contacto de Segurança da Porta de Acesso à zona restrita	Contactos		---	2 x NA + 1 x NF
	Distância Máxima		mm	8
	Design		---	Alvo codificado
Contacto de Segurança da Porta de Acesso aos Pratos	Contactos		---	2 x NF, 1 x NA
Fim de Curso de Segurança	Contactos		---	2 x NF, 1 x NA

4.4.3 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema

O subsistema de segurança pode então ser resumido no diagrama da Figura 49, representando as setas os dados trocados entre este e o sistema de controlo e supervisão. A legenda destas encontra-se na Tabela 33.

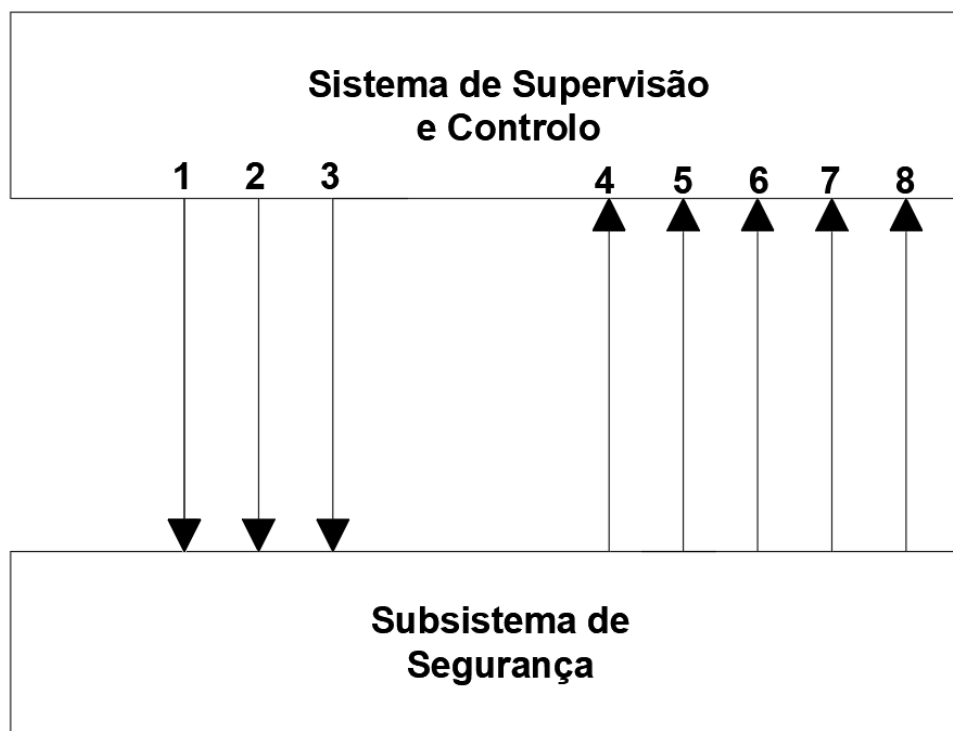


Figura 49 – Diagrama descritivo da interação do subsistema de segurança com o sistema de supervisão e controlo

Tabela 33 – Legenda dos dados trocados entre o subsistema de segurança e o sistema de supervisão e controlo

Nº	Tipo	Variável	Designação no Programa de Controlo	Atributo
1	Input	Ativa Sinal Luminoso Verde	Luminoso_Verde	Digital
2	Input	Ativa Sinal Luminoso Amarelo	Luminoso_Amarelo	Digital
3	Input	Ativa Sinal Luminoso Vermelho	Luminoso_Verde	Digital
4	Output	Sensor da Posição da Porta de trabalho	Porta_Fechada	Digital
5	Output	Sensor da Porta de Acesso à zona interdita	Portão_Fechado	Digital
6	Output	Estado de Emergência	Emergência	Digital
7	Output	Reset do estado de emergência	Reset	Digital
8	Output	Fim de Curso	Fim_de_Curso	Digital

Para além destas variáveis, o Sistema de Controlo e Supervisão monitoriza constantemente as diferentes temperaturas e pressões a que tem acesso, servindo como mais uma garantia que os limites impostos não são ultrapassados. É também o PLC a controlar a torre luminosa, seguindo a norma IEC 60204-1 – Apt. 10.3.

4.5 Painel de Controlo

4.5.1 Descrição de Funcionamento

Como parte da modernização da prensa, o seu painel de controlo sofrerá também alterações. Com o intuito de melhor representar os planos para o novo painel de controlo, foi criado, usando o software *Factory.IO* e ferramentas de edição de imagem, o modelo mostrado na Figura 50.



Figura 50 – Modelo do novo painel de controlo

Este quadro reterá o contador de horas de trabalho original, sendo todos os outros elementos substituídos por versões novas. As funções das diferentes botoneiras estão representadas na Tabela 34.

Tabela 34 – Funções do painel de controlo

Botoneira	Função
Start	Permite a passagem de alimentação elétrica para o circuito de comando.
Reset	Permite que o equipamento saia do estado de emergência.
Stop	Corta a alimentação ao circuito de comando.
Down	No modo manual de operação, permite descer o prato a uma certa velocidade.
Emergency	Obriga o equipamento a entrar no estado de emergência
Up 1/2	Duas botoneiras que necessitam de ser acionadas em simultâneo para ligar o motor do sistema hidráulico de alta pressão. No modo manual, a atuação simultânea permite subir o prato a uma certa velocidade.
Free Mode	Seletor que só pode ser atuado com uma chave. Permite ao equipamento funcionar normalmente com as portas de acesso abertas. Não pode ser usado por um operador normal.

As botoneiras de atuação bi-manual serão mantidas na sua configuração original, não usando o PLC ou um módulo específico para a garantia da simultaneidade da sua atuação, mas sim a configuração eletrónica original. Estas botoneiras funcionam não como uma medida principal de segurança, visto que, com o novo sistema de segurança, não ser possível operar a prensa com a porta de acesso aos pratos aberta, exceto em situações excecionais, mas sim como uma medida de segurança não essencial, mantendo também um modo de operação semelhante ao que os utilizadores da UMEC estão habituados.

As funcionalidades destas botoneiras, e em especial as da HMI, serão mais bem detalhadas no Capítulo 5.

4.5.2 Variáveis de Entrada e Saída do Sistema

Muitas das variáveis trocadas entre o painel de controlo e o sistema de supervisão e controlo foram já mencionadas em secções anteriores, sendo que as que serão representadas na Figura 51 são as que fazem parte unicamente do painel de controlo, estando a sua legenda na Tabela 35

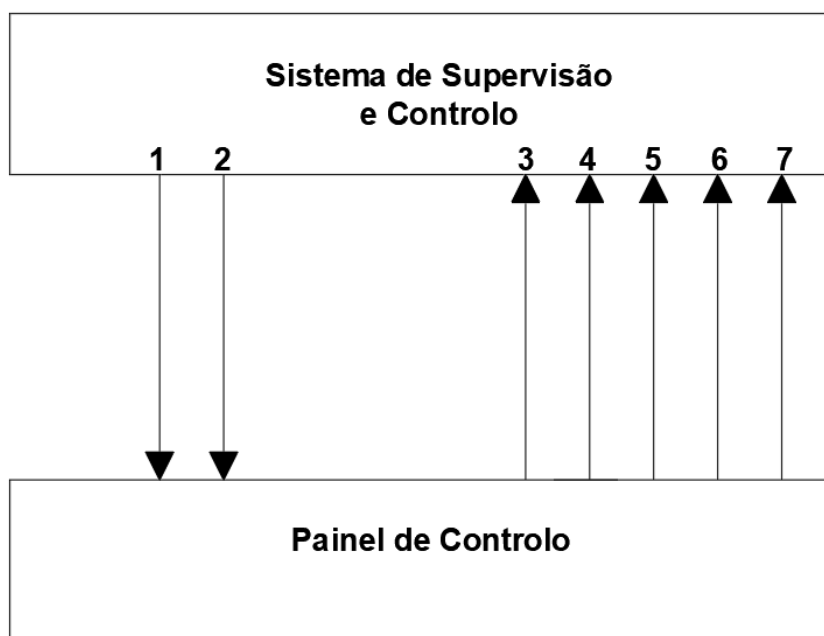


Figura 51 – Diagrama descritivo da interação do painel de controlo com o sistema de supervisão e controlo

Tabela 35 – Legenda dos dados trocados entre o painel de controlo e o sistema de supervisão e controlo

Nº	Tipo	Variável	Designação no Programa de Controlo	Atributo
1	Input	Comunicação com a HMI	---	TCP/IP
2	Input	Contador de horas de trabalho	---	---
3	Output	Botão Start	Start	Digital
4	Output	Botão Stop	Stop	Digital
5	Output	Botão Down	Abrir_Prato	Digital
6	Output	Seletor Modo Livre	Modo_Livre	Digital
7	Output	2 Botões de atuação simultânea	Bi-Manual	Digital

5 Sistema de Supervisão e Controlo

5.1 Equipamentos e Componentes integrados

Os componentes de controlo modernos necessários à consolidação dos sistemas descritos no capítulo 4 estão representados na Tabela 36.

Tabela 36 – Equipamentos adquiridos para o sistema de controlo e supervisão

Equipamento	Imagem	Descrição
HMI		SIMATIC HMI KTP1200 Basic, ecrã com capacidades gráficas para apresentação, manipulação de dados e controle de acesso.
PLC		SIEMENS S7-1200 CPU, funcionará como controlador, monitor e servidor.
Cartas de Aquisição e Controlo		Conjunto de módulos de aquisição e envio de dados, para suportar o funcionamento do PLC.
Fonte 24V		SITOP PSU 100L. Fonte de 24 V, 240W
Caixa de Manobra		Nova caixa de manobra onde serão instalados os novos componentes de controlo.

Sendo os equipamentos descritos nos capítulos anteriores importantes para a modernização da prensa, são os que farão parte do sistema de supervisão e controlo que permitirão que esta possa ser adaptada aos conceitos da Indústria 4.0 e integrada na rede de comunicação da UMEC. Em conjunto, todos os subsistemas descritos formarão um único sistema capaz de fornecer dados suficientes para a eficiente e completa monitorização do processo, seja esta local ou remota, com um maior nível de flexibilidade, fornecendo mais possibilidades aos seus utilizadores e um maior controlo aos responsáveis pela monitorização e manutenção do equipamento.

Será então realizada uma breve descrição das suas características e capacidades principais.

SIMATIC HMI KTP1200 Basic



Figura 52 – SIMATIC HMI KTP1200 Basic

A HMI, Figura 52, servirá como o meio principal de interação com a prensa. Será através desta que as variáveis dos processos a realizar serão introduzidas, os ciclos definidos e o seu estado monitorizado pelo utilizador. Permitirá um maior controlo do acesso à prensa através do uso de perfis de utilizadores, necessitando de realizar *login* antes de ter acesso aos seus controlos. Permitirá também guardar localmente o histórico de trabalho, caso o utilizador assim queira ou a rede da UMEC, que normalmente realizaria esta funcionalidade, não esteja operacional. As suas características principais encontram-se na Tabela 37 sendo que o seu funcionamento e interface serão melhor detalhados na secção 5.3.

Tabela 37 – Características principais da HMI KTP1200 Basic

Característica		Unid.	Valor/Descrição
Ecrã	Tamanho	mm	261,1 x 163,2
	Resolução	pixel	1280 x 800
	Cor	---	Sim
	Tátil	---	Sim
	Nº teclas físicas	---	10
Armazenamento Externo		---	USB
Comunicação Externa	Interface	---	Industrial Ethernet
	Protocolo em uso	---	PROFINET TCP/IP
Gama de Temperatura de Operação		°C	-0...50
Alimentação Elétrica		V	24 DC
		A	0,510

SIEMENS S7-1200 CPU 1214C



Figura 53 – PLC S7-1200 CPU

O PLC S7-1200, Figura 53, servirá como o novo cérebro da prensa hidráulica. Esta adição permitirá facilmente alterar o comportamento da prensa através da alteração da programação instalada, indo de encontro ao princípio da flexibilidade requerida pela Indústria 4.0.

Os ciclos definidos através da HMI serão realizados através do PLC, comandando este os subsistemas da maneira que for necessária. Recolherá e processará os dados dos diferentes sensores distribuídos pela prensa e fará o papel de servidor para os efeitos de integração com a rede da UMEC.

As suas características principais encontram-se na Tabela 38.

Tabela 38 – Características principais do PLC S7-1200

Característica		Unid.	Valor/Descrição
Nº de Entradas	Digitais	---	14
	Analógicas	---	2
Nº de Saídas	Digitais	---	10
	Analógicas	---	0
Programação	Software	---	TIA PORTAL V16
	Linguagens	---	LAD, FBD, SCL
Comunicação Externa	Interface	---	Industrial Ethernet
	Protocolo em uso	---	PROFINET TCP/IP
Gama de Temperatura de Operação		°C	-20...50
Alimentação Elétrica		V	24 DC
		A	0,500

Módulos de Expansão



Figura 54 – Módulos de expansão para o PLC

De forma a auxiliar e complementar a unidade principal de processamento do PLC foram adquiridos vários módulos de expansão, Figura 54.

Estes permitem acrescentar as entradas e saídas analógicas necessárias para a monitorização das variáveis da prensa e para o controlo dos seus atuadores. Estes módulos são compreendidos por duas unidades SM 1231 TC, com a capacidade de ler 8 termopares (de variados tipos) e uma unidade com a capacidade de ler 4 termopares. Para além disso, foram adquiridos uma unidade SM 1231 com 8 entradas analógicas genéricas e uma unidade SM 1232 com 4 saídas analógicas genéricas.

As características principais destes módulos encontram-se na Tabela 39.

Tabela 39 – Características principais dos módulos dos módulos de expansão adquiridos

Característica		Unid.	Valor/Descrição
Módulos de Leitura de Termopares			---
2 x SM 1231 TC 8-AI 1 x SM 1231 TC 4-AI	Nº de entradas	---	8 + 8 + 4
	Resolução	bit	16
	Tipo de Termopar	---	B, C, E, J, K, N, R, S, T, TXK/TXK(L) a GOST
Alimentação Elétrica		V	24 DC
		A	0,040
Módulo de Entrada e Saída Analógica			---
SM 1231 8-AI	Nº de entradas	---	8
	Resolução	bit	13
	Entradas em Tensão	V	-2,5...+2,5 -5...+5 -10...+10
	Entradas em Corrente	A	4...20 0...20
SM 1232 4-A0	Nº de entradas	---	4
	Resolução	bit	14
	Saídas em Tensão	V	-10...+10
	Saídas em Corrente	A	4...20 0...20
Alimentação Elétrica		V	24 DC
		A	0,045
Gama de Temperatura de Operação		°C	-20...50

SITOP PSU 100L

Figura 55 – Fonte SITOP PSU 100L

Foi também adquirido uma fonte de 24V, Figura 55, de modo a alimentar os novos componentes como o PLC, a HMI e o módulo de segurança. As características desta fonte podem ser encontradas na Tabela 40.

Tabela 40 – Características principais da fonte SITOP PSU 100L

Característica		Unid.	Valor/Descrição
Input Nominal	Tensão	V	230 AC
	Corrente	A	2
Output Nominal	Tensão	V	24
	Corrente	A	10
Ligações	Input	---	L, N PE
	Output	---	2 x (+, -)
Gama de Temperatura de Operação		°C	-40...80

5.2 Controlo da Prensa

5.2.1 Parametrização

Estando realizada a definição dos subsistemas da prensa e as suas correspondentes interações com o Sistema de Supervisão e Controlo, temos então definidas as variáveis que este sistema irá monitorizar e controlar. Neste subcapítulo, estes dados serão resumidos e reunidos, indicando a sua ligação ao sistema de controlo, ou seja, o PLC e os seus módulos.

De forma ser possível utilizar as entradas e saídas do PLC, e respetivos módulos, foi necessário realizar certas configurações, como especificar que o tipo de termopar a ser usado (tipo K em todos os termopares). As diferentes entradas e saídas analógicas do PLC foram também configuradas de acordo com as diferentes gamas de utilização apresentadas nas tabelas do capítulo 4.

Começando pela unidade central do PLC, a Figura 56 mostra todas as entradas e saídas disponíveis deste, sendo constituído, como foi referido na Tabela 38, por 14 entradas digitais (%I0.0 a %I1.5), duas entradas analógicas (%IW64 e IW66) e 10 saídas digitais (%Q0.0 a %Q1.1).

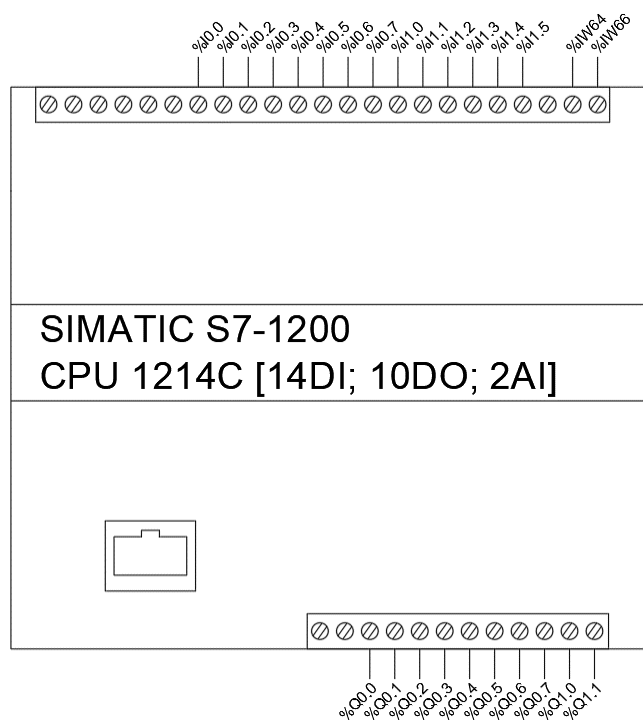


Figura 56 – Representação do PLC S7-1200

A Tabela 41 mostra a correspondência das entradas digitais com as respetivas variáveis e a Tabela 42 e Tabela 43 mostram, igualmente, a correspondência das entradas e saídas analógicas, respetivamente.

Tabela 41 – Entradas digitais

Entrada	Descrição	Nome no Programa
%I0.0	Sensor da porta de acesso aos pratos	Porta_Fechada
%I0.1	Sensor da porta de acesso à área	Portão_Fechado
%I0.2	Seletor para o bypass das portas	Modo_Livre
%I0.3	Atuação da botoneira <i>Start</i>	Start
%I0.4	Atuação da botoneira <i>Stop</i>	Stop
%I0.5	Atuação simultânea do Bi-Manual	Bi_Manual
%I0.6	Atuação da botoneira <i>Down</i>	Down
%I0.7	Atuação de uma botoneira de emergência	Emergência
%I1.0	Atuação da botoneira <i>Reset</i>	Reset
%I1.1	Deteção do prato no seu ponto morto inferior	Fim_de_Curso
%I1.2	Pressostato a detetar o ar de arrefecimento	Ar_Arrefecimento
%I1.3	-----	-----
%I1.4	-----	-----
%I1.5	-----	-----

Tabela 42 – Entradas analógicas

Entrada	Descrição	Nome no Programa
%IW64	Entrada do sinal do transdutor de posição	M_D
%IW66	-----	-----

Tabela 43 – Saídas digitais

Saída	Descrição	Nome no Programa
%Q0.0	Abertura da válvula ar de arrefecimento	Ligar_Ar_Aref
%Q0.1	Comanda a electroválvula EV2	Fechar_Prato
%Q0.2	Comanda a electroválvula EV3	Abrir_Prato
%Q0.3	----	----
%Q0.4	Alimenta as resistências de aquecimento	Ligar_Resistências
%Q0.5	Acende a luz verde na torre luminosa	Luminoso_Verde
%Q0.6	Acende a luz amarela na torre luminosa	Luminoso_Amerelo
%Q0.7	Acende a luz vermelha na torre luminosa	Luminoso_Vermelho
%Q1.0	Controla os SSR do prato superior	Control_R_Sup
%Q1.1	Controla os SSR do prato inferior	Control_R_Inf

A Figura 57 mostra as entradas dos módulos de leitura de termopares. Como foi referido anteriormente, temos dois módulos com 8 entradas e um módulo com 4 entradas para termopares.

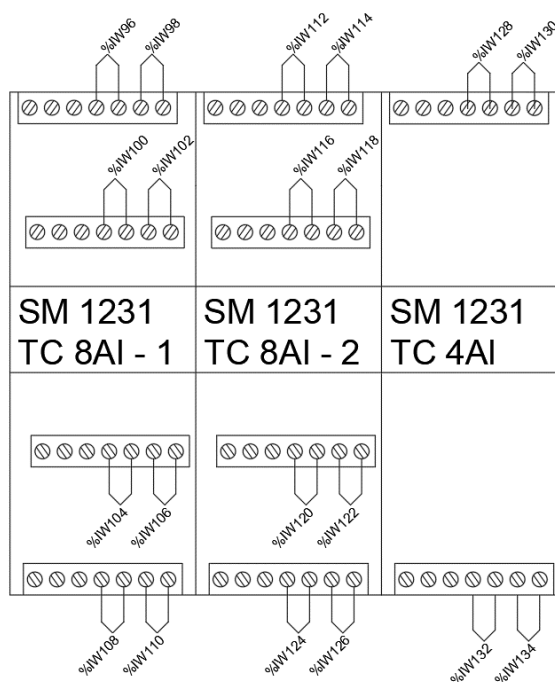


Figura 57 – Representação dos módulos de leitura de termopares

A Tabela 46, Tabela 45 e a Tabela 46 mostram a correspondência de cada entrada com o respetivo termopar.

Tabela 44 – Correspondência entre as entradas do primeiro módulo de 8 entradas com os respetivos termopares

Entrada	Descrição	Nome no Programa
%IW96	Temperatura central do prato inferior	M_Temp_PI_1
%IW98	Temperatura canto posterior esquerdo do P.I.	M_Temp_PI_2
%IW100	Temperatura canto posterior direito do P.I.	M_Temp_PI_3
%IW102	Temperatura canto anterior esquerdo do P.I.	M_Temp_PI_4
%IW104	Temperatura canto anterior direito do P.I.	M_Temp_PI_5
%IW106	Temperatura central do prato superior	M_Temp_PS_1
%IW108	Temperatura canto posterior esquerdo do P.S.	M_Temp_PS_2
%IW110	Temperatura canto posterior direito do P.S.	M_Temp_PS_3

Tabela 45 – Correspondência entre as entradas do segundo módulo de 8 entradas com os respectivos termopares

Entrada	Descrição	Nome no Programa
%IW112	Temperatura canto anterior esquerdo do P.S.	M_Temp_PS_4
%IW114	Temperatura canto anterior direito do P.S.	M_Temp_PS_5
%IW116	-----	-----
%IW118	-----	-----
%IW120	Temperatura do reservatório de fluido térmico	M_Temp_SA_R
%IW122	Temperatura da linha de alimentação do P.I.	M_Temp_SA_LI
%IW124	Temperatura da linha de alimentação do P.S.	M_Temp_SA_LS
%IW126	Temperatura ambiente na zona da prensa	M_Temp

Tabela 46 – Correspondência entre as entradas do módulo de 4 entradas com os respectivos termopares

Entrada	Descrição	Nome no Programa
%IW128	Temperatura da C.C. do canto posterior esquerdo	M_Temp_CC_1
%IW130	Temperatura da C.C. do canto posterior direito	M_Temp_CC_2
%IW132	Temperatura da C.C. do canto anterior esquerdo	M_Temp_CC_3
%IW134	Temperatura da C.C. do canto anterior direito	M_Temp_CC_4

Finalmente, a Figura 58 mostra uma representação do módulo de 8 entradas analógicas e o módulo com 4 saídas analógicas. A Tabela 47 e a Tabela 48 mostram a correspondência entre estas entradas e saídas com as variáveis correspondentes.

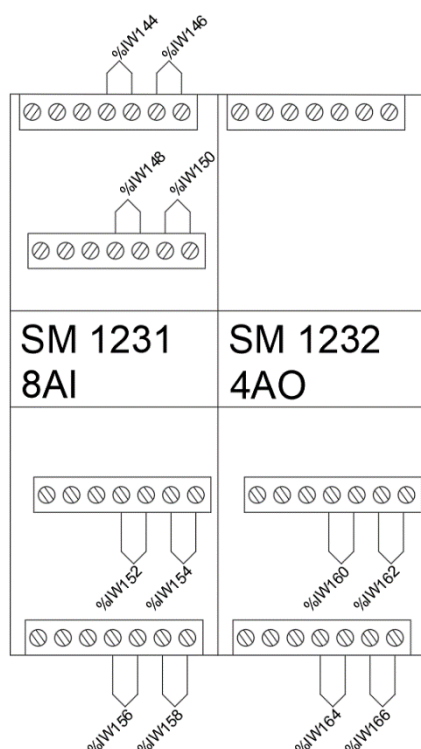


Figura 58 – Representação dos módulos de entradas e saídas analógicas

Tabela 47 – Entradas analógicas

Entrada	Descrição	Nome no Programa
%IW144	Sinal de pressão do transdutor original	M_P_Válvula
%IW146	Sinal de pressão do novo transdutor	M_P_Linha
%IW148	Sinal de temperatura vindo do termorregulador	M_Temp_SA_T
%IW150	-----	-----
%IW152	Sinal da C.C. do canto superior esquerdo	M_CC_1
%IW154	Sinal da C.C. do canto superior direito	M_CC_2
%IW156	Sinal da C.C. do canto inferior esquerdo	M_CC_3
%IW158	Sinal da C.C. do canto inferior direito	M_CC_4

Tabela 48 – Saídas analógicas

Saída	Descrição	Nome no Programa
%IW160	Sinal para o circuito de condicionamento da válvula proporcional	Ref_Pressão
%IW162	Sinal da referência de temperatura enviada para o termorregulador	Ref_Temperatura
%IW164	Sinal de controlo da bomba da linha inferior	Ref_Caudal_Inf
%IW166	Sinal de controlo da bomba da linha superior	Ref_Caudal_Sup

5.2.2 Comportamento do Sistema

Estando as variáveis a que o Sistema de Supervisão e Controlo tem acesso definidas, podemos então especificar o comportamento desejado para a prensa.

Podemos considerar que a prensa, durante a sua operação, poderá encontrar-se em três modos principais: *standby*, o estado inicial, ativo no momento em que se liga a prensa, o estado de operação, estando este subdividido em operação manual ou automática, e o estado de emergência, sendo este estado ativo quando um dos elementos de segurança é atuado, independentemente do estado em que a prensa se encontre, Figura 59.

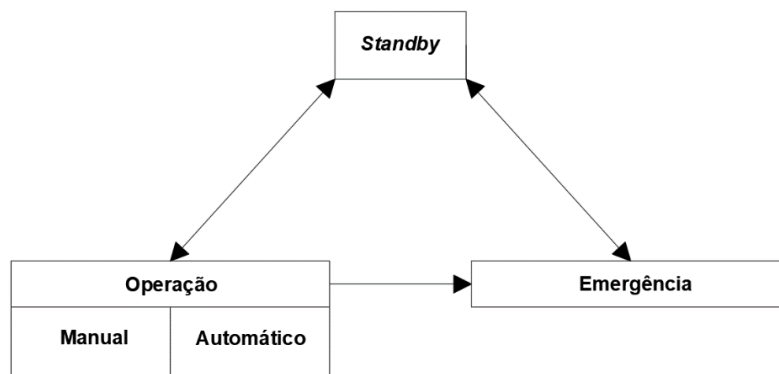


Figura 59 – Modos principais do comportamento da prensa

Cada modo contém dentro de si um conjunto de estados e condições que, quando reunidas, condicionam o comportamento da prensa.

Modo Standby

Este é o modo a que a prensa volta sempre que é ligada ou quando termina um modo de operação ou sai do modo de emergência. Dependendo das credenciais inseridas no login inicial, o utilizador pode ter acesso às funções básicas da prensa ou também às funções de administrador, como alterar os perfis dos utilizadores gravados ou o limitar o acesso a certas funcionalidades.

Cada ecrã individual dos modos de operação contém um botão que informa o PLC que é esse o modo que tem de ativar. Os estados gerais contidos neste modo encontram-se representados na Figura 60 com uma descrição mais detalhada de cada, e das condições de alteração de estado, na Tabela 49 e Tabela 50, respetivamente.

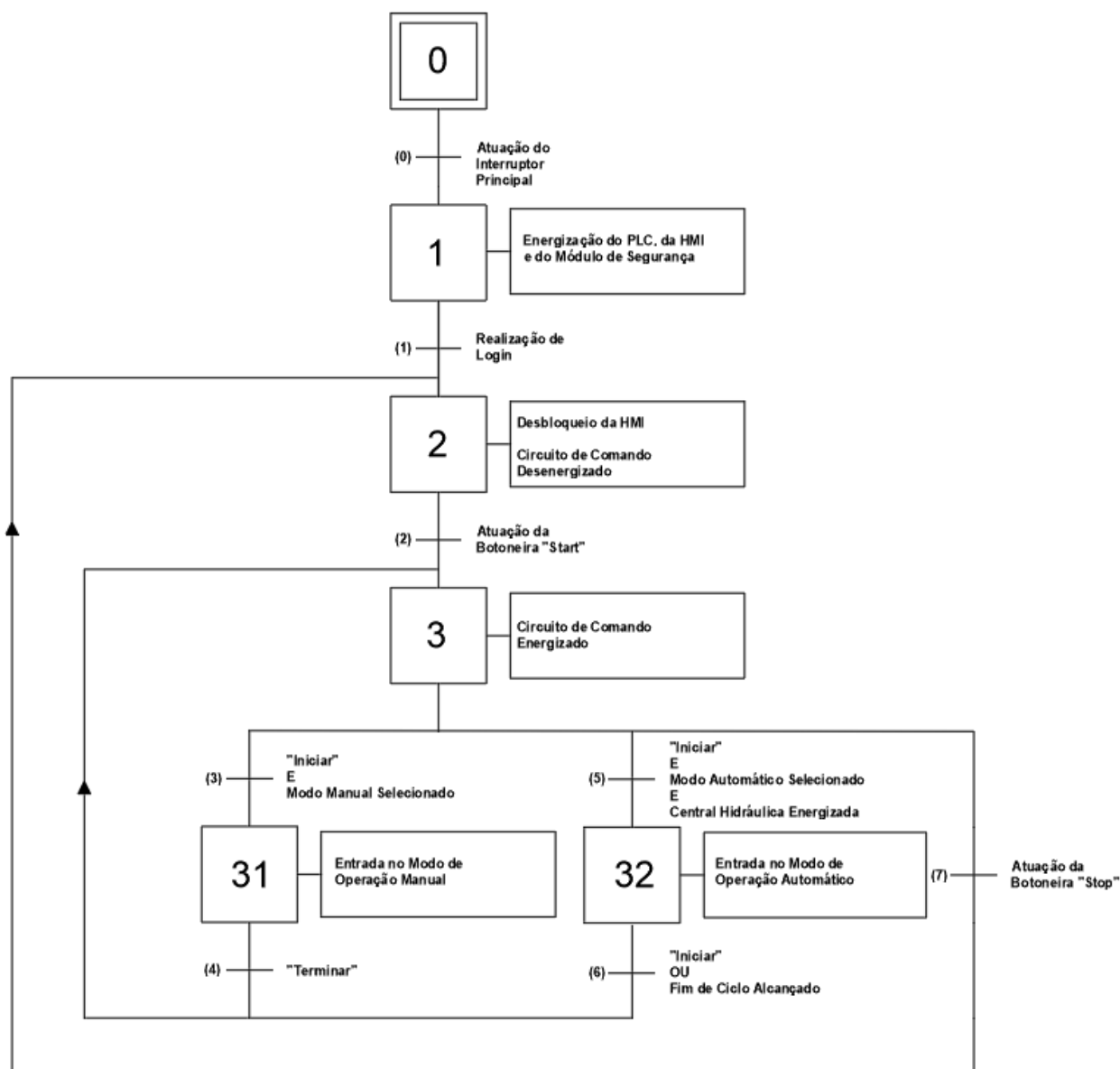


Figura 60 – Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo *standby*

Tabela 49 – Descrição dos estados do modo de standby

Etapa	Descrição
0	Interruptor principal encontra-se aberto e a prensa está completamente desenergizada.
1	Com o interruptor fechado, é energizada a fonte de 24V SITOP e, com ela, o PLC, HMI e módulo de segurança. A HMI entra imediatamente no ecrã de login.
2	A HMI encontra-se desbloqueada. O utilizador pode transitar entre ecrãs, alterar definições e inserir ciclos.
3	O circuito de comando encontra-se energizado e o sistema pode então entrar no modo de operação manual ou automático.
31	Sistema entra no modo de operação manual, entrando no comportamento representado na Figura 62.
32	Sistema entra no modo de operação automático, entrando no comportamento representado na Figura 61

Tabela 50 – Descrição das transições do modo de standby

Transições	Descrição
0	Atuação do interruptor principal QO
1	Realização de Login com credenciais válidas.
2	Atuação da botoneira “Start”
3	Atuação no botão “Iniciar” na HMI quando no ecrã do modo de operação manual
4	Atuação no botão “Terminar” na HMI quando no ecrã do modo de operação manual
5	Atuação no botão “Iniciar” na HMI quando no ecrã do modo de operação automática Pressão da central hidráulica maior do que o bar
6	Atuação no botão “Terminar” na HMI quando no ecrã do modo de operação automática Fim do ciclo programado
7	Atuação da botoneira “Stop”, desenergizando o circuito de comando

Modo de Operação Automático

Neste modo a prensa, após o seu início, funciona sem a necessidade de um operador. É esperado que, anteriormente ao começo, o operador tenha já definido os ciclos que quer aplicar, quer de força quer temperatura. Com o início do ciclo, a HMI bloqueia a navegação dos ecrãs até que este acabe ou seja interrompido.

A definição dos ciclos é realizada através da introdução de pontos individuais (por exemplo, um ponto conterà um tempo e uma dada temperatura) e, através de um relógio contido no PLC este consegue determinar a “posição” atual do ciclo, e interpolar os valores que separam um ponto do seguinte. Quando todos os ciclos alcançam o seu ponto final, a prensa abre o prato e sai do modo de operação automático, voltando para o modo *standby*.

As diferentes fases da leitura e aplicação de ciclos encontram representadas na Figura 61, com uma descrição mais detalhada na Tabela 51 e na Tabela 52.

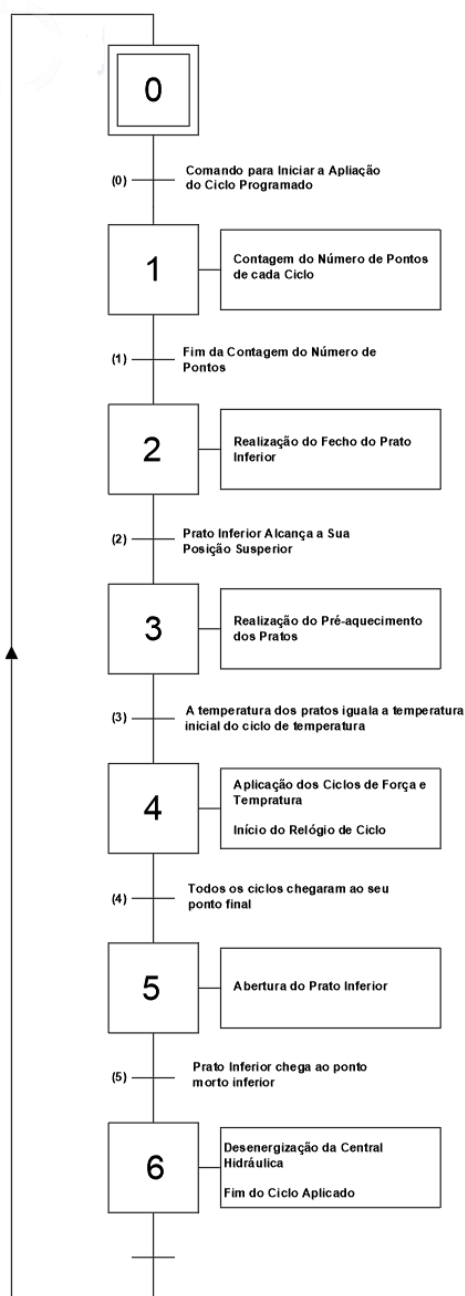


Figura 61– Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo de operação automático

Tabela 51 – Descrição dos estados do modo de operação automático

Etapa	Descrição
1	O PLC percorre a memória dos ciclos gravados e conta o número de pontos até que o ponto tempo do ponto seguinte seja menor que o anterior.
2	Set da pressão para um valor mínimo. Atuação da electroválvula EV2
3	Envio do valor de temperatura do primeiro ponto do ciclo para o termorregulador.
4	Começo da contagem do tempo. Envio das referências de força e temperatura lidas nos ciclos para os respectivos controladores.
5	Set da pressão para um valor mínimo. Atuação da electroválvula EV3
6	Desenergização da central hidráulica através da atuação do fim de curso. Transição de volta para o modo <i>standby</i> .

Tabela 52 – Descrição das transições do modo de operação automático

Transições	Descrição
0	Atuação no botão “Iniciar” na HMI quando no ecrã do modo de operação automática Pressão da central hidráulica maior do que o bar
1	Bit de sinalização do fim da contagem dos ciclos passa a 1.
2	Estando a electroválvula EV2 atuada, o prato encontra-se dentro de uma gama de posições perto do seu ponto superior, mantendo-se imóvel.
3	A diferença da temperatura inicial do ciclo e da média das temperaturas centrais dos pratos encontra-se abaixo de um certo valor.
4	Os bits que sinalizam o fim dos ciclos encontram-se todos a 1.
5	Fim de Curso atuado.

Modo de Operação Manual

Neste modo o operador pode definir independentemente as diferentes variáveis de controlo. Após um set inicial das referências para valores seguros, para evitar movimentações ou temperaturas inesperadas, os comandos são desbloqueados. Através de botões na HMI o operador pode definir a temperatura de referência a enviar ao termorregulador, tal como fechar e abrir manualmente o prato. Com o prato fechado, o operador pode também definir a força a ser aplicada nos pratos.

Estando este modo ativo, o operador não pode navegar pelos menus da HMI até que volte para o modo *standby*. Os diferentes estados deste modo estão representados na Figura 62 com uma descrição mais detalhada na Tabela 53 e Tabela 54.

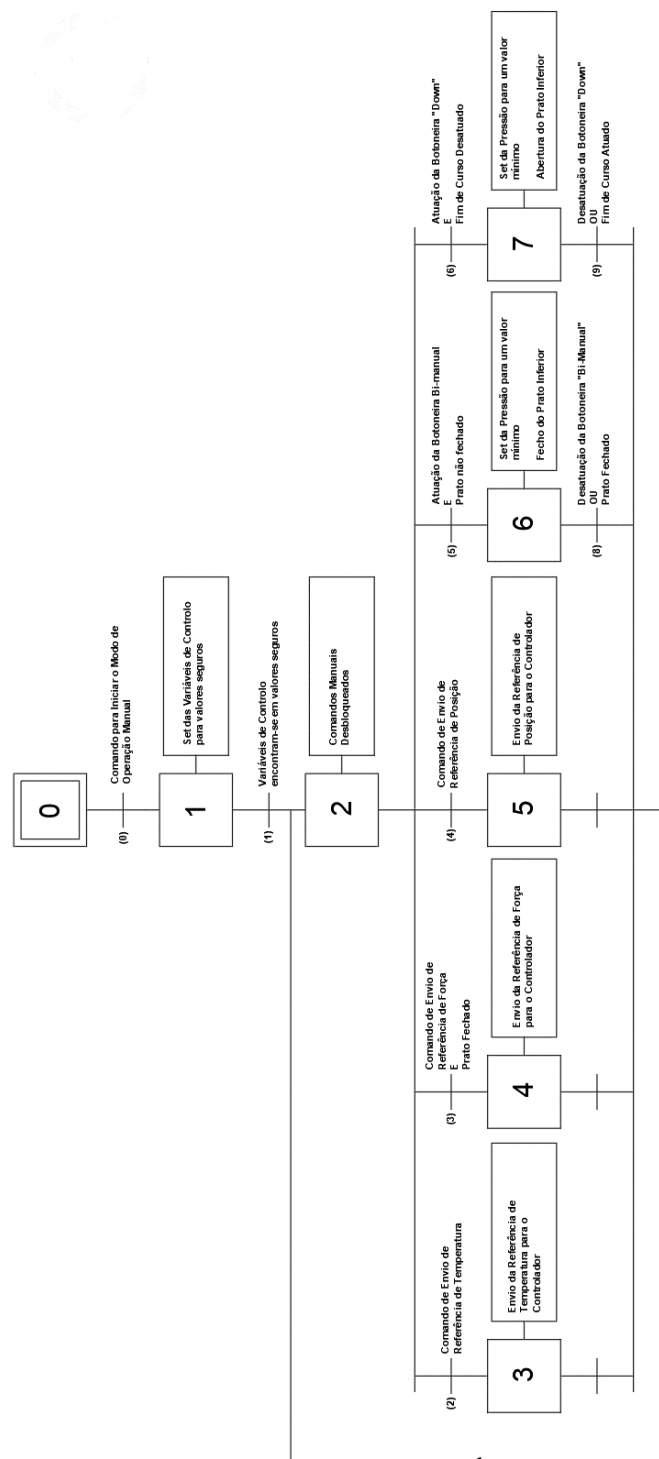


Figura 62 – Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo de operação manual

Tabela 53 – Descrição dos estados do modo de operação manual

Etapa	Descrição
1	Set das diferentes referências de controlo para valores mínimos e seguros
2	Desbloqueio dos comandos de modo manual. Capacidade de alterar, independentemente, a temperatura e força ou posição
3	Transferência do valor de temperatura introduzido para o controlador que envia a referência de temperatura para o termorregulador.
4	Transferência do valor de temperatura introduzido para o controlador que envia a referência de força para o termorregulador.
5	Transferência do valor de temperatura introduzido para o controlador que envia a referência de posição para o termorregulador.
6	Set da pressão para um valor mínimo. Atuação da electroválvula EV2
7	Set da pressão para um valor mínimo. Atuação da electroválvula EV3

Tabela 54 – Descrição das transições do modo de operação manual

Transições	Descrição
0	Atuação no botão “Iniciar” na HMI quando no ecrã do modo de operação manual
1	As saídas de referência de temperatura e pressão encontram-se a 0 e as electroválvulas EV2 e EV3 encontram-se desatuadas.
2	Comando de envio de referência de temperatura na HMI
3	Comando de envio de referência de pressão na HMI Prato encontra-se fechado
4	Comando de envio de referência de posição na HMI
5	Atuação do comando bi-manual e os pratos não estão fechados
6	Atuação da botoneira “Down” e o fim de curso não se encontra atuado.
7	Prato encontra-se fechado ou a desatuação do comando bi-manual.
8	Fim de curso do cilindro atuado ou desatuação da botoneira “Down”.

Modo de Emergência

Este modo pode ser considerado como estando a ocorrer em paralelo com os modos anteriores, permitindo o seu funcionamento ou não.

Existem então, como se pode ver na Figura 63, dois ramos distintos de comportamento do modo de emergência. No modo normal, seguindo pelas etapas 1 e 2, a atuação de uma (ou ambas) botoneira de emergência obriga a prensa a interromper o que quer que estivesse a fazer, bloqueando qualquer ação de controlo até que a condição de emergência seja resolvida. Este ramo normal obriga também a prensa a entrar no estado de emergência quando uma das portas, quer de acesso aos pratos ou à zona interdita descrita na secção 4.4, é aberta durante a operação da prensa. No segundo ramo, ou o ramo do “Modo Livre”, seguindo pela etapa 3, a abertura das portas já não obriga a prensa a entrar no estado de emergência, sendo que este “Modo Livre” só pode ser alcançado da maneira descrita também na secção 4.4. Após o retorno para um estado seguro, o programa de controlo reverte para o modo *standby*, sendo necessário recomençar do princípio qualquer ciclo que estivesse a ser realizado aquando a ocorrência de uma emergência.

Uma descrição mais detalhada dos estados e condições de transição encontra-se na Tabela 55 e na Tabela 56.

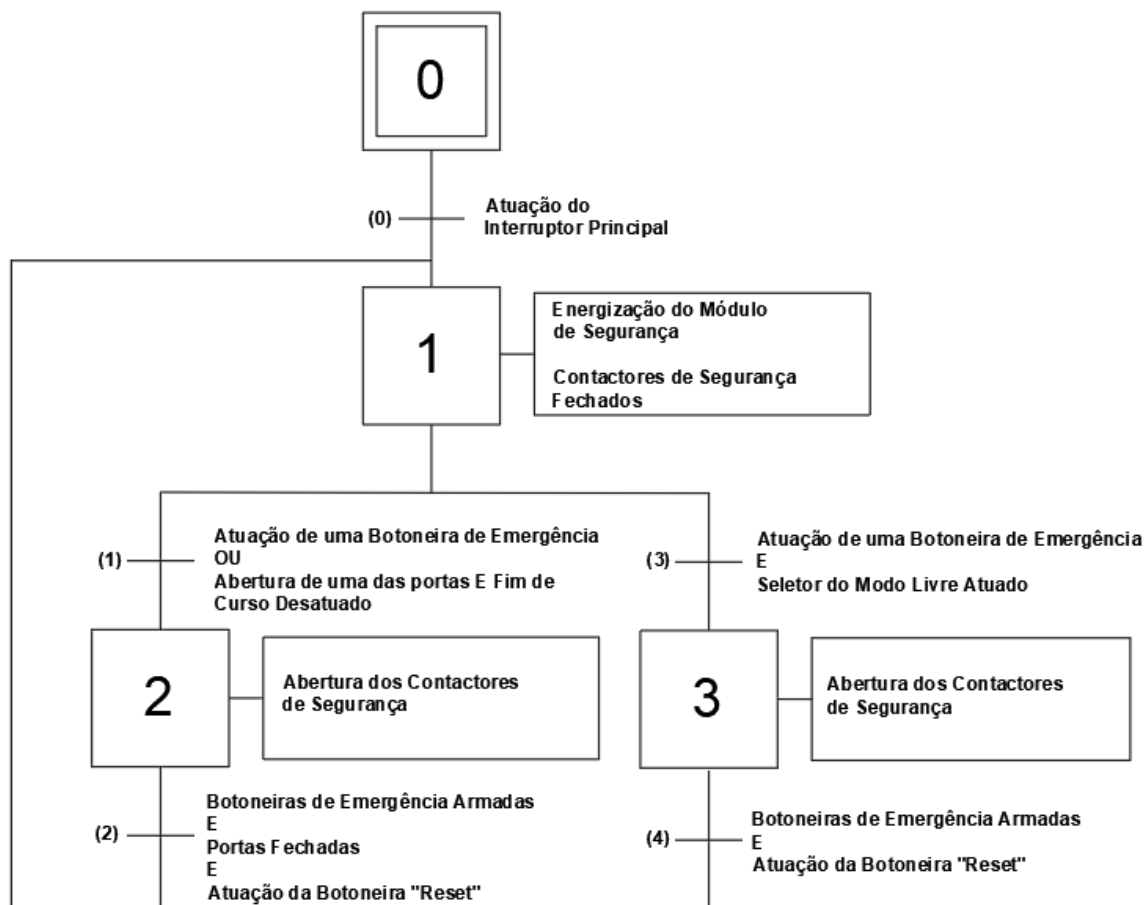


Figura 63 – Diagrama descritivo do comportamento da prensa no modo de emergência

Tabela 55 – Descrição dos estados do modo emergência

Etapas	Descrição
0	Prensa encontra-se completamente desenergizada.
1	Módulo de segurança energizado e contactores de segurança fechados. Torre de luz com sinalização verde.
2	Contactores de segurança abertos. Torre de luz com sinalização vermelha.
3	Contactores de segurança abertos. Torre de luz com sinalização vermelha.

Tabela 56 – Descrição das transições do modo de emergência

Transições	Descrição
0	Atuação do interruptor de energia
1	Atuação de uma botoneira de emergência. Abertura de uma das portas estando o fim de curso desatuado.
2	Botoneiras de Emergência Armadas Portas Fechadas Atuação da Botoneira “Reset”
3	Atuação de uma botoneira de emergência. Seletor do Modo Livre a 1
4	Botoneiras de Emergência Armadas Atuação da Botoneira “Reset”

5.2.3 Controladores de Processo

Existem três parâmetros associados à execução do trabalho da prensa que terão de ser controlados. Estes são a temperatura dos pratos, a força exercida nestes quando fechados e a posição do prato inferior.

O controlo da força será realizado pelo PLC. Utilizando a soma dos valores das células de carga para determinar a força a ser atuada, o PLC utilizará este valor para variar a referência a enviar para a carta de controlo da válvula proporcional. Utilizando as funcionalidades de auto ajuste do PLC S7-1200, serão estimados, através de um teste ao sistema, os parâmetros de um controlador PID. Para garantir a segurança e evitar variações bruscas da pressão na central hidráulica, será também utilizado um bloco limitador da taxa de variação temporal do *output* do controlador. Este controlador está representado no esquema da Figura 64.

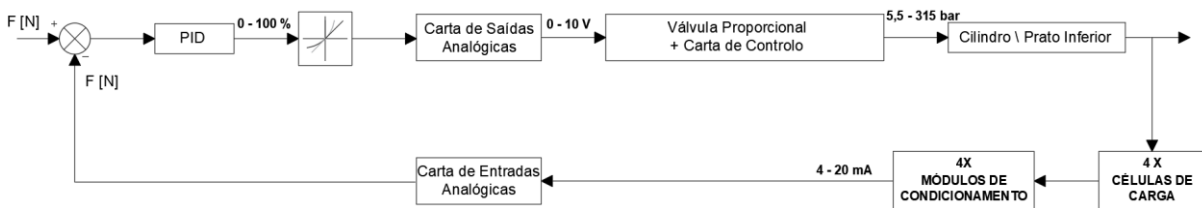


Figura 64 – Esquema do controlador de força

No que respeita ao controlo da temperatura dos pratos, e como foi referido na secção 4.1.1, o sistema que irá ser implementado e validado nesta primeira fase será o sistema de controlo mais simples. Assim, o controlo da temperatura do óleo será realizado pelo controlador integrado no termorregulador, enquanto que a referência de temperatura que lhe é enviada será definida pelo PLC, através de um controlador. Este controlador será do tipo PID, não será necessário um limitador de variação do sinal de controlo, como no sistema de controlo de força, visto não existirem variações bruscas que possam danificar o sistema. O controlador do PLC terá a responsabilidade de enviar uma referência de temperatura que compense as perdas de calor que o óleo sofre desde o tanque interno do termorregulador até aos pratos, sendo os seus parâmetros também estimados utilizando as funcionalidades de auto ajuste do PLC. Pode-se observar uma representação deste controlador na Figura 65.

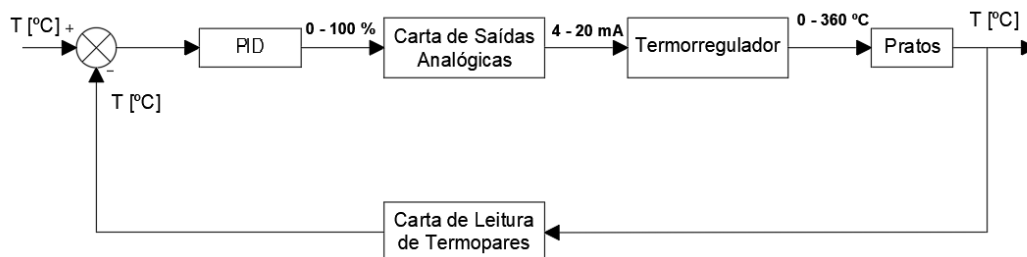


Figura 65 – Esquema do controlador de temperatura

O controlo de posição será baseado num controlador *on/off* através da atuação da válvula direcional, visto que existe uma pressão mínima, como descrito no capítulo 4.3.1, impedindo o controlo fino do movimento. Usando o potenciómetro linear, para comunicar ao PLC a posição do prato, assim que este detetar que o prato chega à posição desejada, o PLC desatuará a válvula direcional. É esperado um erro significativo, sendo necessário realizar ajustes a este controlo.

Estes controladores serão testados e avaliados, tal como os seus parâmetros estimados, no Capítulo 7

5.3 HMI - Interface Homem-Máquina

5.3.1 Dados partilhados com o PLC

Para além dos dados trocados entre os subsistemas e o PLC, o cérebro do sistema de supervisão e controlo, existem um conjunto de variáveis trocadas internamente entre o PLC e a HMI que também são importantes de identificar para a melhor compreensão do sistema de controlo.

Em primeiro lugar, todos os *inputs* e *outputs* do PLC e respetivos módulos são transmitidos à HMI. Isto para permitir ao utilizador uma fácil acessibilidade a estes e, caso seja necessário, uma mais fácil apreciação de qualquer mau funcionamento do equipamento. Estes dados são apresentados nos ecrãs da Figura 81.

Após estes, o conjunto de dados mais importantes partilhados entre a HMI e o PLC são os ciclos de trabalho. Devido à forma como a partilha de dados é realizada entre estes dois elementos no *software* TIA Portal, o PLC em si apenas tem gravado na sua memória um único ciclo de trabalho para cada variável do processo (por exemplo, temperatura ou força). Estes ciclos são compostos por um máximo de 30 “pontos”, cada ponto sendo composto por um “tempo” e um valor de, por exemplo, temperatura. É a HMI que consegue gravar múltiplos ciclos, sendo estes, após o devido comando, enviados para o PLC.

Finalmente, é na HMI que são introduzidos certos comandos e informações relevantes para o funcionamento correto do equipamento. Estes dados são representados são destacados na programação do PLC e da HMI com o prefixo “c_”, estando detalhados na Tabela 57.

Tabela 57 – Variáveis de comando trocadas entre a HMI e o PLC

Nome	Descrição
c_Iniciar	Comando para iniciar e, assim, transitar do modo <i>standby</i> para um dos modos de operação manual ou automático.
c_Terminar	Comando para, no modo de operação manual, voltar para o modo <i>standby</i> e, no modo de operação automático, interromper o ciclo que está a ser lido e, mais uma vez, voltar para o modo <i>standby</i> .
c_In_Pressão	Em ambos os modos de operação o operador tem a opção de introduzir valores de pressão (em bar) em vez de valores de força (em N). Esta variável informa o PLC que tipo de dados estão a ser introduzidos.
c_Área_da_Peça	No caso de se inserir valores de pressão, de forma a realizar o controlo através das células de carga, é então necessário introduzir a área da peça a tratar. Esta variável, em mm ² , fornece esta informação ao PLC.
c_Modo_Auto	Variável que informa o PLC que modo de operação é que deve ser ativo após o comando para iniciar. É definida através de qual ecrã a ser apresentado. No ecrã de operação manual o seu valor é 0, e no ecrã do modo automático o seu valor é 1.
c_Força_Manual	Valor de força manualmente introduzido.
c_Temp_Manual	Valor de temperatura manualmente introduzido.
c_Posição_Manual	Valor de posição manualmente introduzido.
c_Enviar_Força	Bit a comandar a transferência do valor de força manualmente introduzido para a área de processamento e envio de referência.
c_Enviar_Temp	Bit a comandar a transferência do valor de temperatura manualmente introduzido para a área de processamento e envio de referência.
c_Enviar_Posição	Bit a comandar a transferência do valor de posição manualmente introduzido para a área de processamento e envio de referência.
c_Offline_Logging	Bit a comandar o registo de dados numa memória externa ligada à HMI.
c_Iniciar_Log	Bit a controlar o início do registo de dados numa memória externa ligada à HMI.
c_Terminar_Log	Bit a controlar o fim do registo de dados numa memória externa ligada à HMI.
c_Livre	Bit que se encontra a 1 quando o ecrã de login está ativo, informando assim que a prensa está disponível para a gravação remota de ciclos.
c_Trigger	Bit que controla a transferência de um ciclo gravado na memória do PLC para a HMI. Este bit é de uso externo, servindo para que utilizadores remotos consigam introduzir ciclos remotamente.
c_Tipo_Ciclo	Nome to tipo de ciclo a introduzir remotamente (por exemplo, temperatura)
c_Nome_Ciclo	Nome a dar ao ciclo introduzido remotamente (por exemplo, Temperatura_3)

5.3.2 Dashboard

De maneira que a HMI seja útil como instrumento de interação, é necessário que este seja intuitivo e compreensível. Especialmente, como foi dito no capítulo 2.2, no contexto da indústria 4.0, onde uma grande quantidade e variedade de dados está a ser exibida ao utilizador.

Com este facto em mente, foi desenhada uma interface para a prensa atualizada, usando o software TIA Portal da *Siemens*.

O primeiro ecrã que o utilizador irá encontrar será o de login, Figura 66. Este ecrã por si só garante a segurança contra o uso do equipamento por pessoal não autorizado, só permitindo o acesso aos controlos da prensa a pessoal com credenciais válidas.

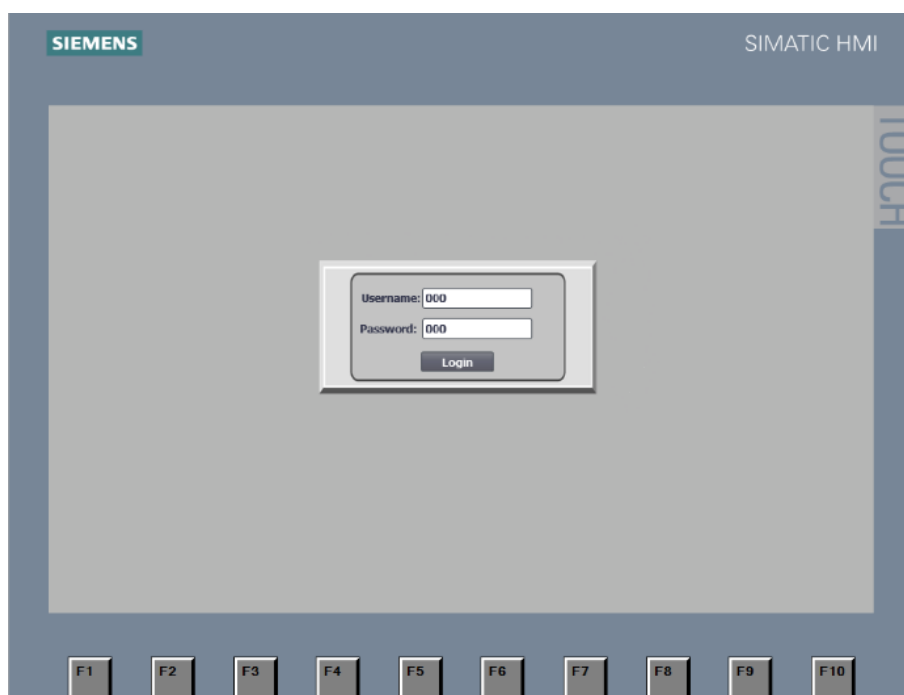


Figura 66 – Ecrã de login

Após o login, o utilizador é levado para o ecrã do modo de operação manual, Figura 67. Neste ecrã é mostrado uma visão simplificada do estado da prensa.

O modelo do prato move-se dependendo da posição do prato real e são representadas as temperaturas centrais de cada prato, a temperatura média das células de carga e a referência de temperatura a ser enviada para o termorregulador tal como a temperatura do óleo neste. Pode-se também ver se o ar de arrefecimento das células de carga está a ser utilizado tal como a pressão na central hidráulica e a força, exercida no prato, se este estiver fechado, sendo que também é mostrado a pressão na câmara inferior do cilindro. Uma segunda versão deste ecrã contém também a temperatura do óleo no reservatório, Figura 68, sendo que esta será para o sistema de controlo de temperatura completo da Figura 35.

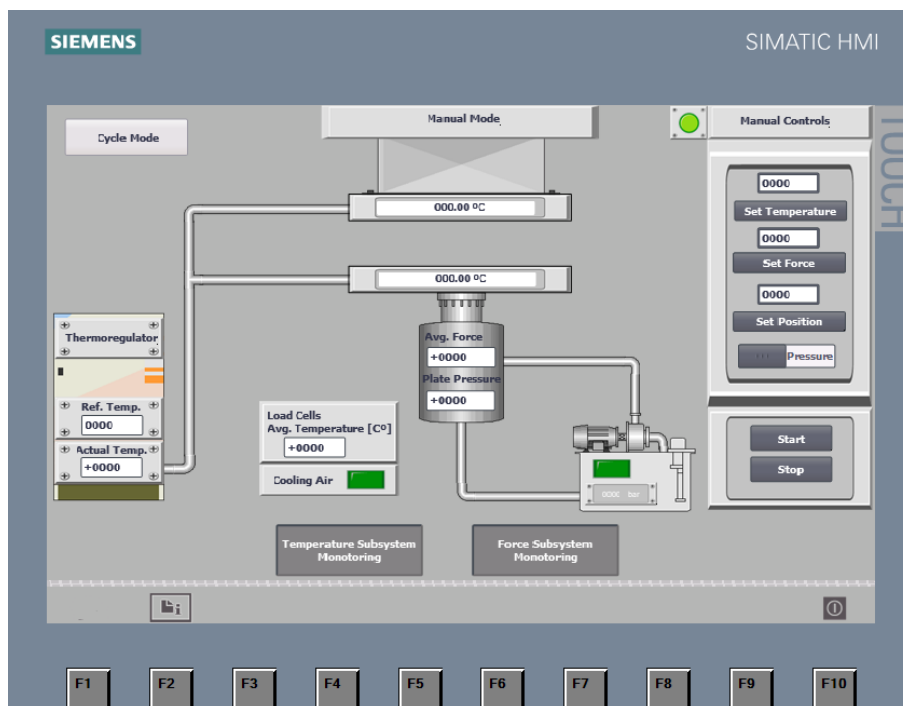


Figura 67 – Ecrã de modo de operação manual do sistema simples

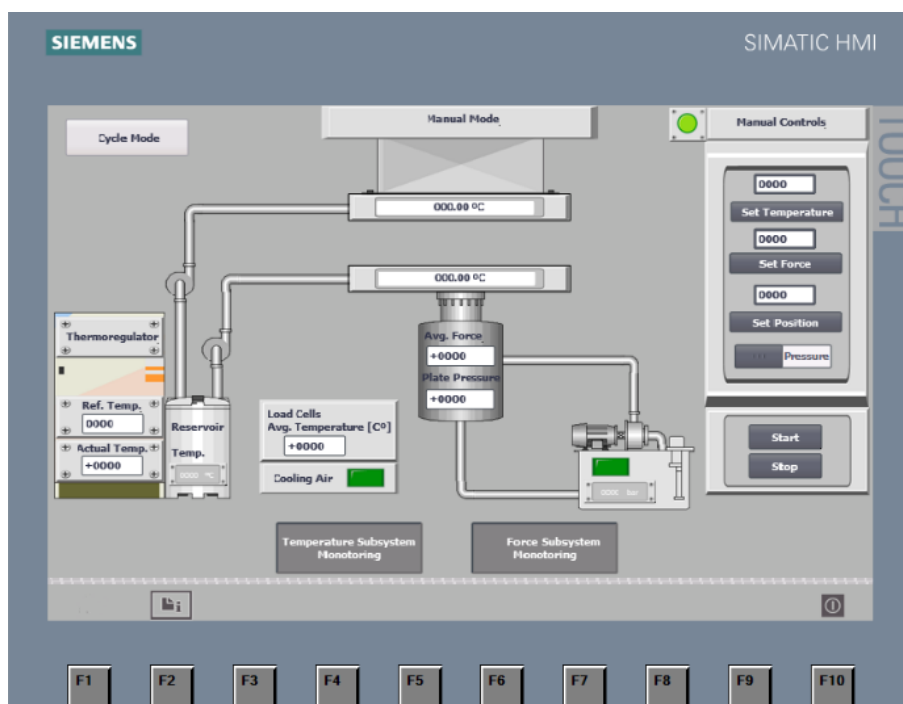


Figura 68 – Ecrã de modo de operação manual do sistema com controlo individual da temperatura de cada prato

Os botões na zona central inferior navegam para dois ecrãs onde são mostrados em maior detalhe os subsistemas de controlo de força e temperatura. Os botões “Start” e “Stop” desbloqueiam e bloqueiam, respetivamente, os controlos do modo manual (sendo que este desbloqueio é representado por uma “luz” verde no canto superior direito) tal como bloqueiam a transição para outro ecrã que não os ecrãs de detalhe dos subsistemas. Os valores de força podem ser inseridos como valores de pressão, dependendo do que for mais conveniente para o utilizador.

No ecrã de detalhe do sistema de controlo força, Figura 69, podem ser vistas as temperaturas e cargas individuais de cada célula, para além da média dos valores de temperatura e a soma das cargas tal como a pressão lida pelos dois transdutores de pressão deste sistema.

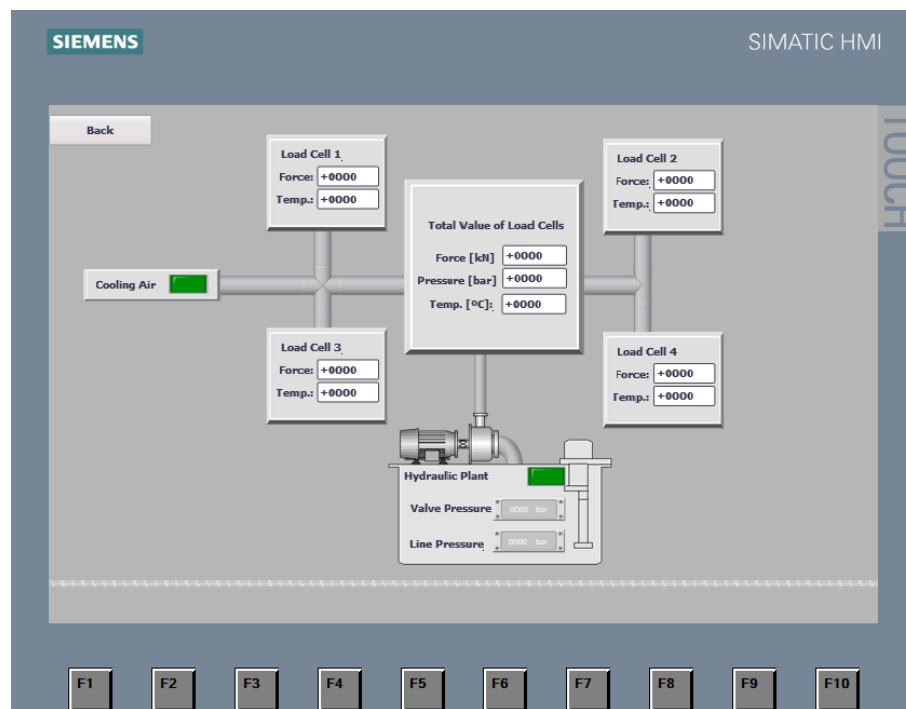


Figura 69 – Ecrã de detalhe do sistema de controlo de força

Para o ecrã de detalhe do sistema de controlo de temperatura, Figura 70, podem ser observados os valores individuais de cada termopar tal como a temperatura das linhas de fluido térmico.

Na versão para o sistema completo, Figura 71, é mostrado também o valor a ser enviado para cada uma das bombas de linha, tal como a temperatura do óleo no reservatório.

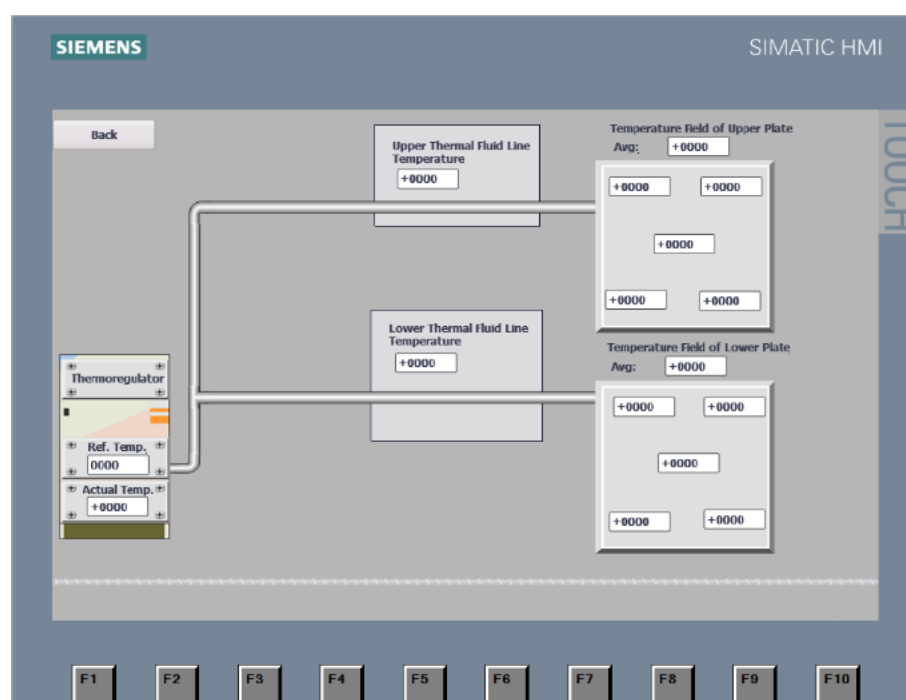


Figura 70 – Ecrã de detalhe do sistema de controlo de temperatura do sistema mais simples

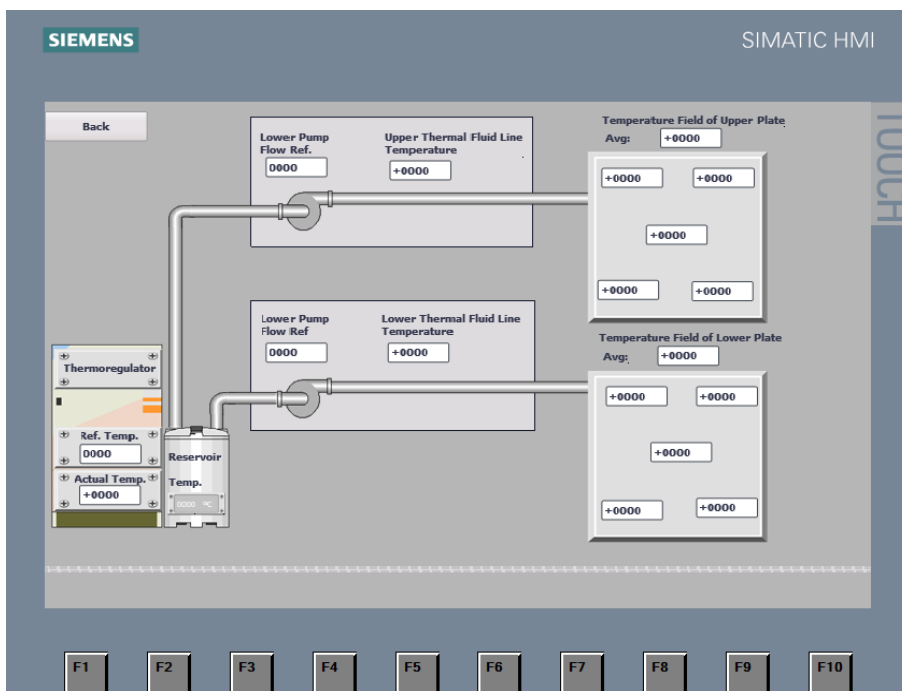


Figura 71 – Ecrã de detalhe do sistema de controlo de temperatura do sistema com controlo individual da temperatura de cada prato

Na Figura 72, temos o ecrã do modo de operação automático e, tal como para o modo manual, uma versão do sistema de controlo de temperatura mais simples e uma versão para o sistema completo, Figura 73. Este ecrã é igual ao ecrã do modo manual em relação aos dados que mostra ao utilizador, sendo que os ecrãs de detalhe dos sistemas de temperatura e força são os mesmos.

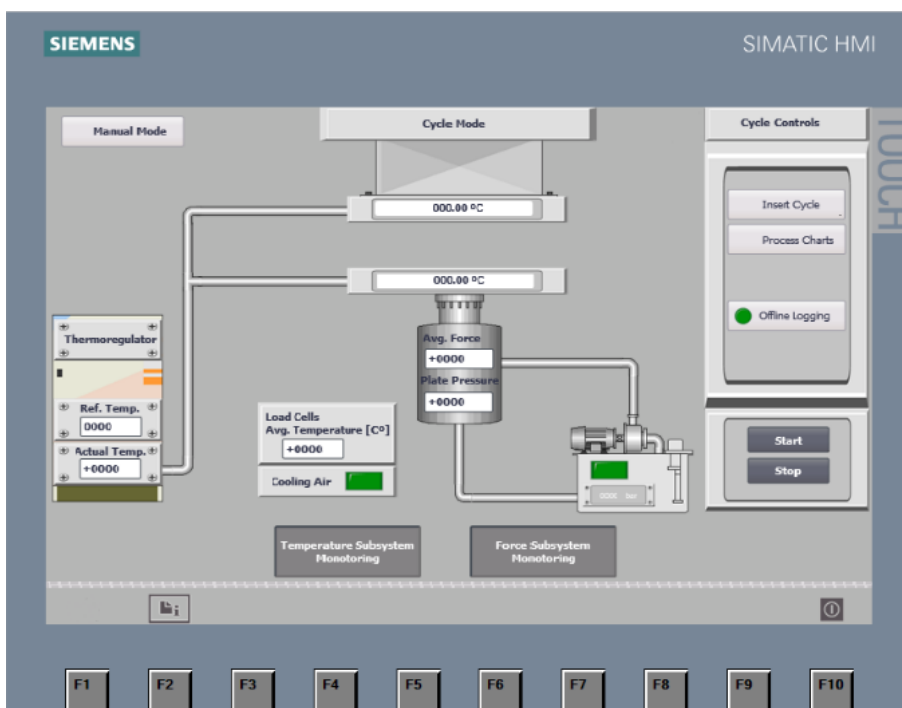


Figura 72 – Ecrã de modo de operação automático do sistema mais simples

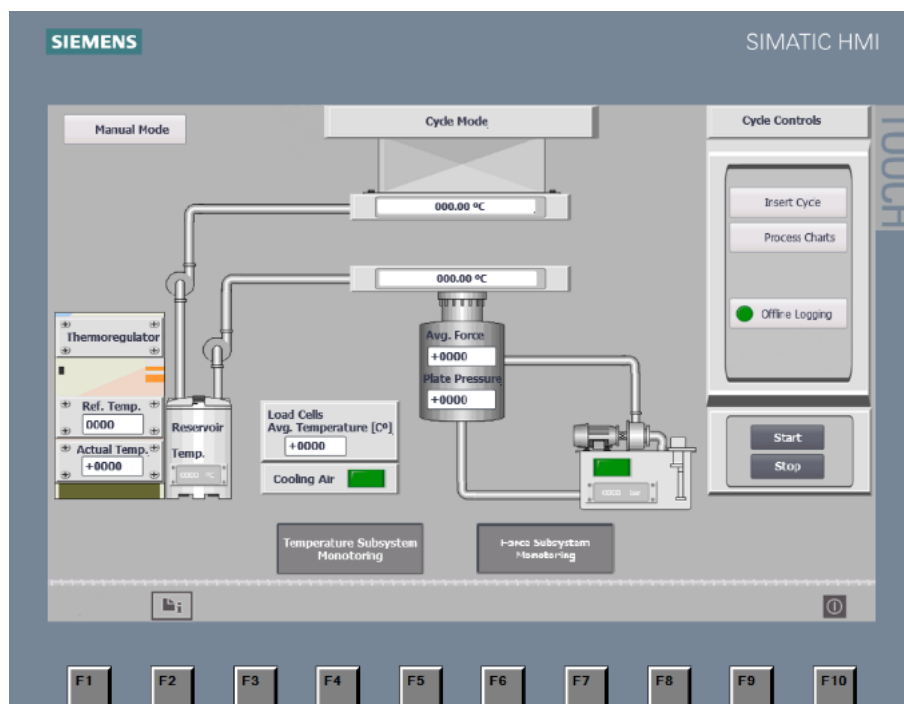


Figura 73 – Ecrã de modo de operação automático do sistema com controlo individual da temperatura de cada prato

Os botões à direita permitem a navegação para o ecrã de inserção de ciclos e o de visualização gráfica do ciclo a ser aplicado, tal como a ativação do *logging* de dados offline, sendo necessário a inserção de uma *flashdrive* na HMI para que este possa ocorrer. Os botões “Start” e “Stop” começam e interrompem a execução dos ciclos, respetivamente. Durante a operação, o utilizador está limitado ao ecrã do modo automático, aos ecrãs de detalhe dos subsistemas e ao ecrã de visualização da evolução dos ciclos.

A Figura 74 apresenta o ecrã onde se insere os ciclos de temperatura e força a aplicar. Os valores de força podem ser inseridos como força ou pressão, dependendo do que for conveniente para o utilizador. Se os valores forem inseridos como valores de pressão será necessário também especificar a área da placa a ser tratada.



Figura 74 – Ecrã de inserção ou seleção de ciclos

O ecrã da Figura 75 permite ver a evolução do ciclo a ser aplicado, sobrepondo em tempo real os valores a ser aplicados com os valores gravados no ciclo. Assim o utilizador consegue rapidamente ver qualquer desvio que esteja a acontecer na aplicação dos ciclos. Em ambos os ecrãs da Figura 74 e da Figura 75, o botão físico da HMI F10 retorna o utilizador para o ecrã do modo de operação automático.

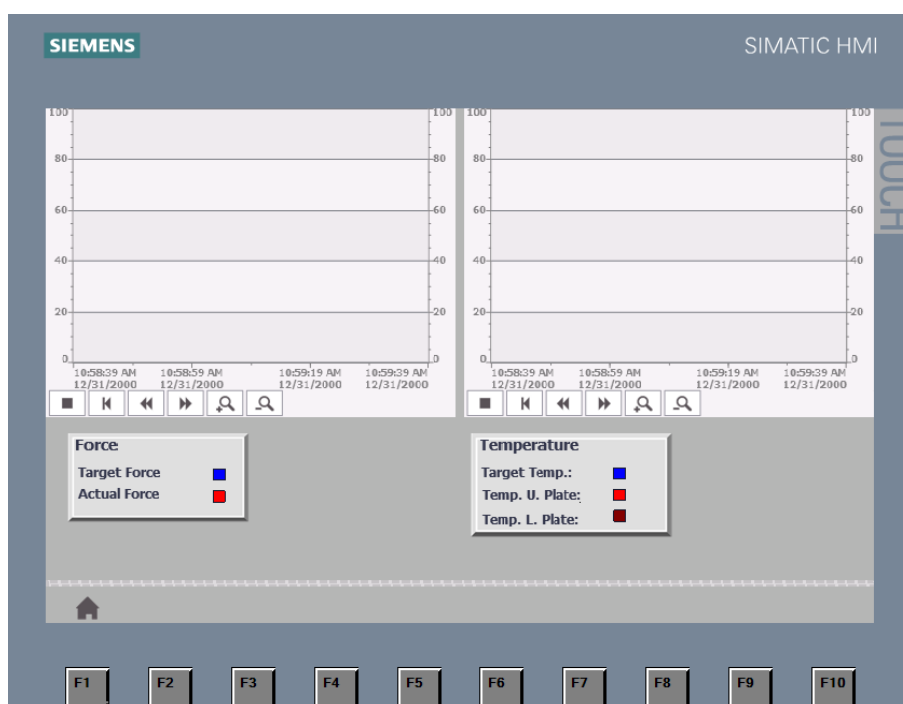


Figura 75 – Ecrã de visualização da evolução dos ciclos

Quando nos ecrãs principais de operação manual ou automática, se estes modos não estiverem ativos ou caso o sistema não esteja no modo de emergência, os botões físicos do ecrã F2 e F10 encontram-se desbloqueados e funcionais. O botão F10 realiza o *logoff* do utilizador, levando a HMI para o ecrã da Figura 66. Por outro lado, o botão F2 leva o utilizador para o ecrã da Figura 76.

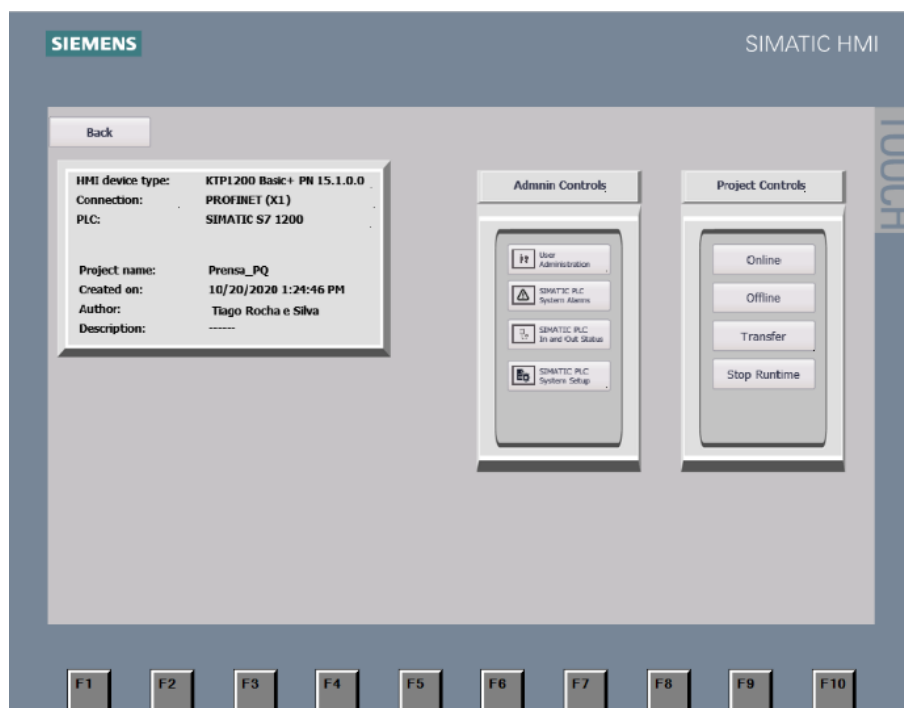


Figura 76 – Ecrã de opções

Este ecrã disponibiliza ao utilizador as informações gerais do programa tal como permite que este, tendo as credenciais com um nível de permissão alto o suficiente, aceda aos comandos de administrador e aos comandos da HMI em si.

Os comandos da HMI (Project Controls) permitem ao utilizador realizar operações de manutenção ao software, como o upload de novas versões ou a interrupção do *runtime* da HMI.

Os controlos de administrador (Admin Controls) permitem aceder, por ordem, ao ecrã de controlo de utilizadores, Figura 77, à lista de alarmes e avisos, Figura 78, aos ecrãs do estado do PLC, Figura 79 à Figura 81, e ao ecrã de *setup* do sistema, Figura 82.

O controlo de utilizadores, acessível só a administradores do sistema, permite adicionar, eliminar ou alterar o perfil de utilizadores.

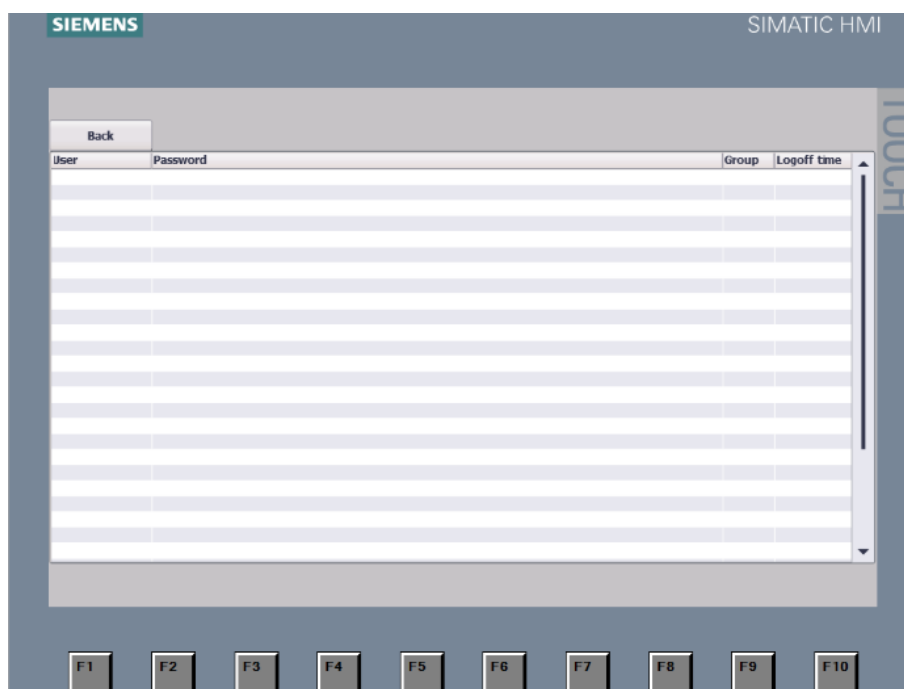


Figura 77 – Ecrã de administração de utilizadores

O ecrã da Figura 78 regista a altura e tipo de alarme ocorrido. Fornecendo um histórico das ocorrências de emergência ou erros detetados pelo PLC.

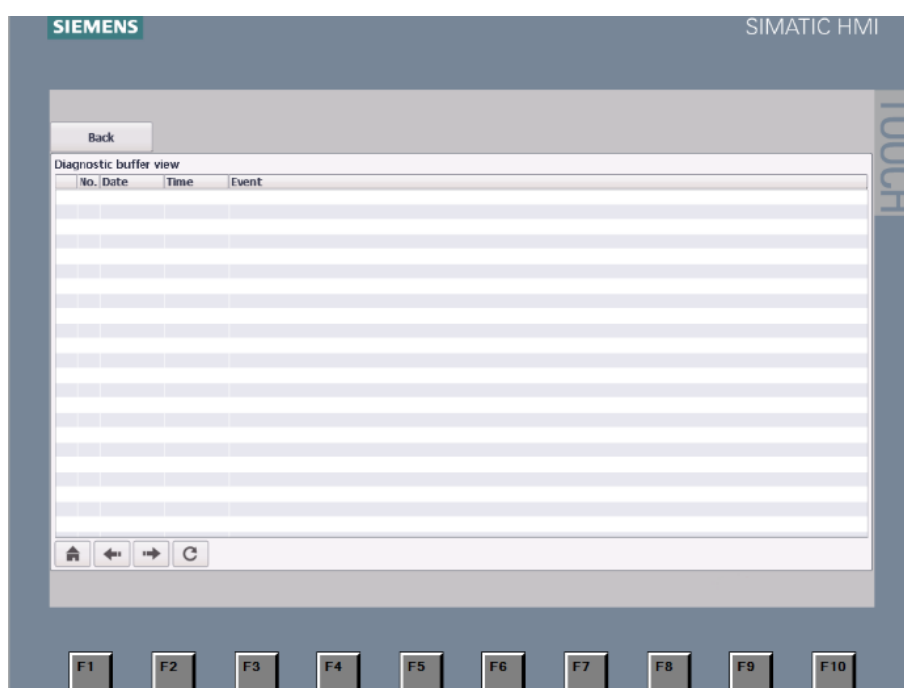


Figura 78 – Ecrã de visualização do histórico de alarmes

Os ecrãs do estado do PLC, três ao todo, permitem ao utilizador verificar o estado das saídas e entradas do CPU e respetivos módulos. Um seletor permite alterar o valor mostrado para as entradas e saídas analógicas, podendo estas mostrarem os valores reais ou os valores das variáveis correspondentes (por exemplo, no caso da saída analógica IW162, que envia um sinal em corrente para o termorregulador, configurada para 4-20mA, o valor mostrado pode ser um valor entre 4 e 20 ou o valor correspondente de temperatura a ser enviado para o termorregulador).

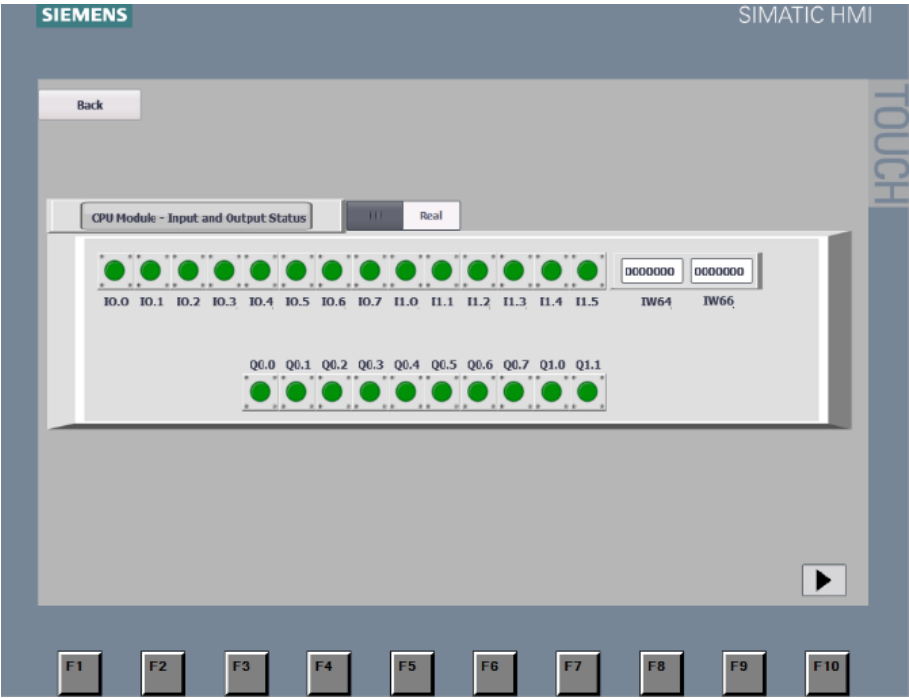


Figura 79 – Ecrãs de visualização do estado das entradas e saídas do PLC

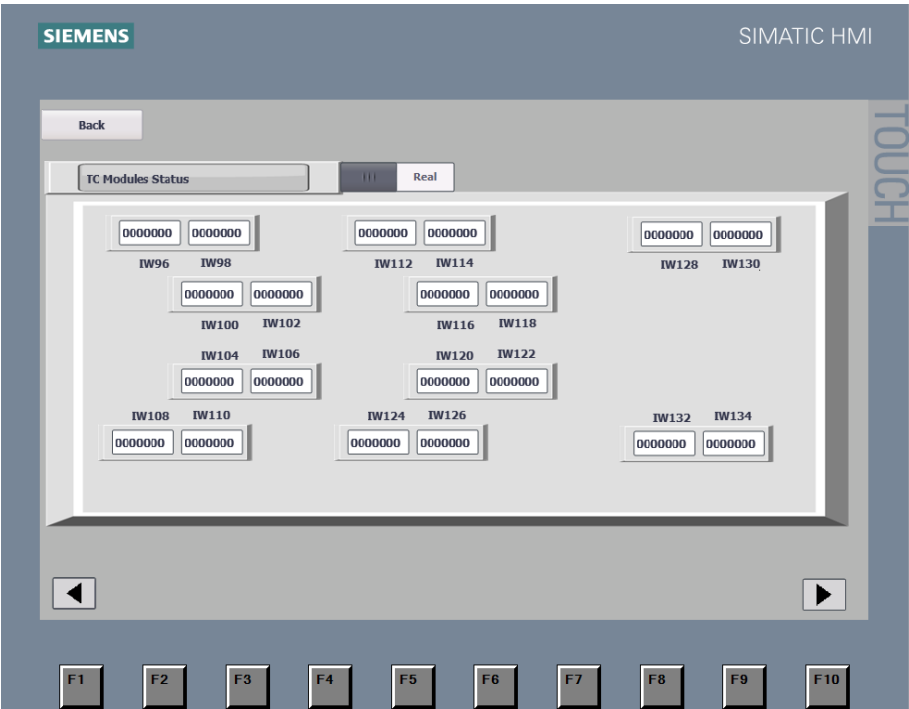


Figura 80 – Ecrãs de visualização do estado das entradas e saídas dos módulos de leitura de termopares

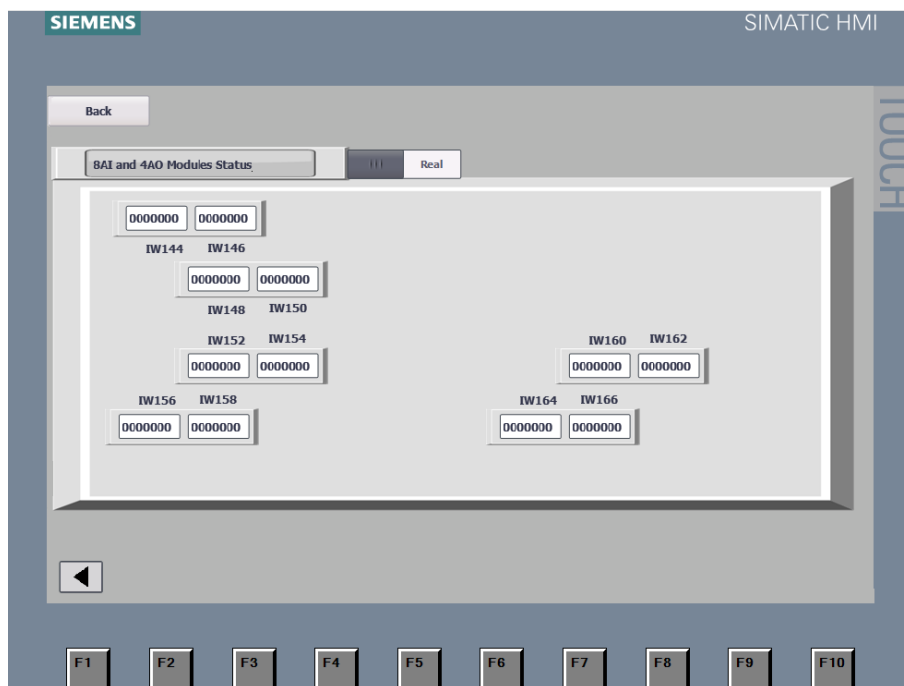


Figura 81 – Ecrãs de visualização do estado das entradas e saídas dos módulos de entradas e saídas analógicas

O ecrã da Figura 82 permite ao administrador do equipamento seleccionar limites para os valores de temperatura e força que um utilizador pode definir (sendo o máximo de temperatura dos pratos aplicado à temperatura lida por qualquer um dos termopares), tal como o valor de carga aceitável par cada célula de carga individual, a temperatura máxima destas e a temperatura que ativa o ar de arrefecimento. Quando se instalar o sistema de controlo de temperatura completo, também se poderá definir o valor máximo e mínimo do caudal de cada bomba de linha.

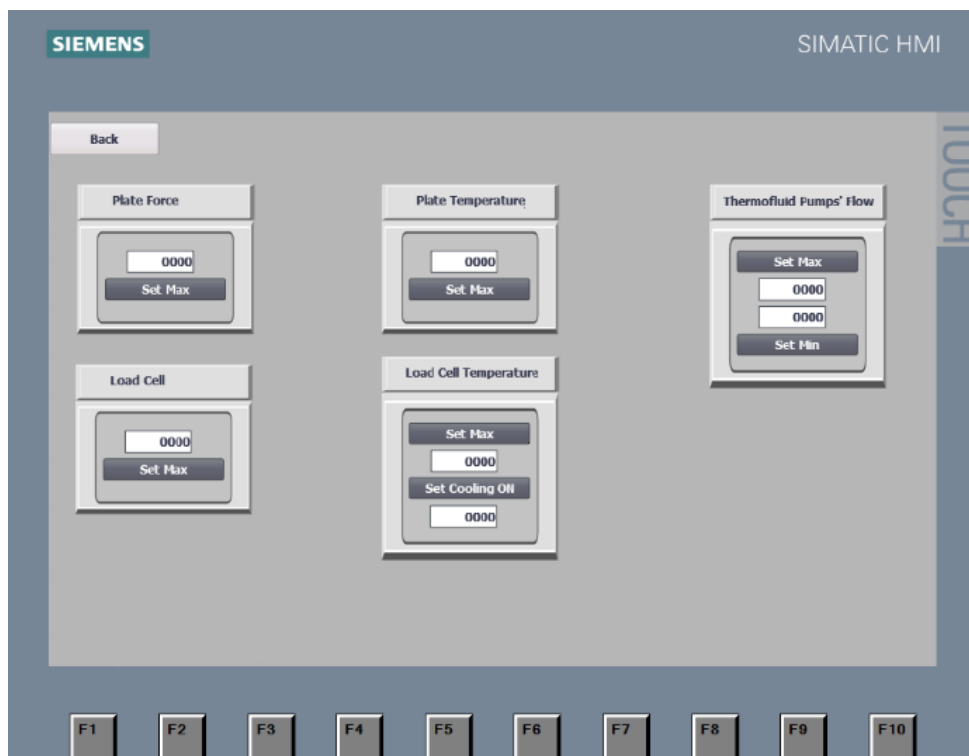


Figura 82 – Ecrã do setup de limites para os parâmetros dos processos

5.4 Ligação OPC-UA

5.4.1 Revisão Bibliográfica

Como foi referido na secção 3.3, a comunicação com a rede interna da UMEC será realizada utilizando a arquitetura de comunicação *Open Platform Communication - Unified Architecture* (OPC-UA).

OPC-UA é uma arquitetura independente da plataforma a ser usada, com uma estrutura em camadas, capaz de acomodar novas tecnologias, algoritmos ou metodologias mantendo a compatibilidade com versões e equipamentos mais antigos. É reconhecida como um standard na automação industrial, fornecendo interoperabilidade horizontal e vertical, desde o nível dos sensores e atuadores até os níveis de controlo e comunicação centralizados. Em termos de segurança, é considerado como sendo uma solução viável e robusta, apesar de apresentar certas falhas dependendo da linguagem de programação usada (Drahoš et al. 2018) (Mühlbauer et al. 2020).

5.4.2 Funcionalidades Remotas e Integração com a Rede

Apesar da flexibilidade da arquitetura de comunicação, as funcionalidades remotas que serão preparadas serão limitadas. Por razões de segurança e praticabilidade, utilizadores remotos estarão limitados a visualizar o estado da prensa e a gravar ciclos de trabalho, não sendo permitido a atuação da prensa remotamente.

Os dados partilhados com a rede, de forma a serem integrados de forma uniforme entre todos os equipamentos da UMEC, terão de ter uma nomenclatura também uniforme. Esta nomenclatura *standard* foi definida pela unidade, estando esta nomenclatura apresentada nas

Estado da Prensa

Os dados sobre o estado da prensa que serão partilhados com a rede interna da UMEC foram decididos em conjunto com outros elementos da unidade, de forma que a prensa esteja em conformidade com os outros equipamentos da rede.

Assim, o utilizador remoto terá acesso aos dados contidos na Tabela 58.

Tabela 58 – Dados sobre o estado da prensa partilhados para a rede interna da UME

Dado		Nome na Rede
Temperaturas	Prato Inferior [1...5]	PPQ_mon_TemperaturePI_[1...5]
	Prato Superior [1...5]	PPQ_mon_TemperaturePS_[1...5]
Força	Célula de Carga [1...4]	PPQ_mon_Force_[1...4]
Deslocamento		PPQ_mon_PlatePosition

Gravação de Ciclos

O novo sistema da prensa disponibiliza a gravação de vários ciclos de trabalho. Estes ciclos são gravados na memória da HMI e não do PLC. Como a comunicação entre a prensa e a rede da UMEC é realizada através do PLC, de maneira a gravar os ciclos na HMI é necessário primeiro apagar os ciclos presentemente gravados na memória do PLC, substituí-los e depois transferi-los para a HMI. Por essa razão a gravação de ciclos através de meios remotos estará limitada a só ser possível quando nenhum utilizador estiver a utilizar a prensa, ou seja, quando a prensa se encontrar no ecrã de *login*. Como indicado na Tabela 57, existe um bit na memória do PLC que, quando alterado, transfere os ciclos gravados na memória deste para a HMI. A *dashboard* remota deverá assim apresentar esta opção. Outro bit informa o utilizador remoto que a prensa se encontra disponível para a introdução de um ciclo.

Tabela 59 – Dados para a gravação remota de ciclos

Dado	Nome na Rede
Livre	PPQ_oth_InUse
Trigger	PPQ_oth_Upload
Tipo de Ciclo	PPQ_oth_CycleType
Nome do Ciclo	PPQ_oth_CycleName

6 Projeto Elétrico

6.1 Cálculo das Potências

6.1.1 Principais Componentes Consumidores

De maneira a garantir um equilíbrio do consumo de corrente por entre as fases, foram determinadas as necessidades de consumo dos principais componentes, sendo estes o motor do conjunto hidráulico, o termorregulador e os motores das bombas de linha e resistências de aquecimento. Estes dois últimos componentes, apesar de não estar previsto a sua implementação numa fase inicial, serão incluídos de forma salvaguardar futuras alterações.

Motor do Conjunto Hidráulico de Alta Pressão

Sendo um motor trifásico de indução, foi primeiro verificado o tipo de ligação existente entre as suas bobinas. A Figura 83 mostra os terminais de ligação do motor, encontrando-se este ligado em estrela.

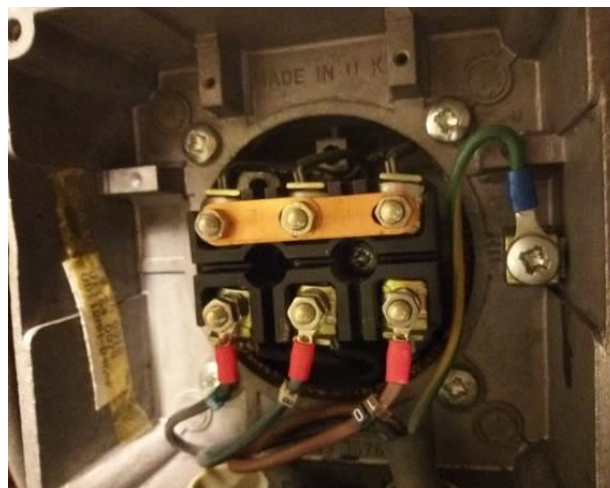


Figura 83 – Terminais das bobines do motor do conjunto hidráulico de alta pressão

Assim, usando a equação 6.1

$$P = V_f * I_f * P_f * \eta * 3 \quad (6.1)$$

Onde:

P é o valor de potência mecânica do motor, [W];

V_f é o valor da tensão de fase, [V];

I_f é a corrente de fase, [A];

P_f é o fator de potência;

η é o rendimento do motor.

O consumo de corrente do motor, por fase será então:

$$I_f = \frac{P}{V_f * P_f * \eta * 3} = \frac{4000}{230 * 0,8 * 0,825 * 3} = 8,78A$$

Verificando a placa do motor, Figura 84 podemos ver que para este motor, para uma ligação em estrela, o consumo de corrente será de 9,2 A. Esta discrepância entre o valor calculado e o valor indicado tem a ver com o facto de o valor indicado na placa ter sido calculado com uma alimentação de 220V. Assim, usando a mesma equação 6.1, temos:

$$I_f = \frac{P}{V_f * P_f * \eta * 3} = \frac{4000}{220 * 0,8 * 0,825 * 3} = 9,18A$$

tal como indicado na Figura 84. O motor pode, quando alimentado a 230V, fornecer uma potência de 4,18kW mantendo o consumo de 9,2A.



Figura 84 – Placa com as características do motor do conjunto hidráulico de alta pressão

Termorregulador TT-390 Z

O termorregulador é também alimentado por corrente trifásica, sendo a potência de alimentação 17,9 kW, como se pode ver pela sua placa, Figura 85.



Figura 85 – Placa do termorregulador TT-390 Z

Assim, usando a equação 6.2:

$$P_{ele} = V_f * I_f * P_f * 3 \quad (6.2)$$

Onde:

P_{ele} é o valor de potência elétrica do termorregulador, [W];
 V_f é o valor da tensão de fase, [V];
 I_f é a corrente de fase, [A];
 P_f é o fator de potência.

Assumindo um fator de potência de 0,85

$$I_f = \frac{P_{ele}}{V_f * P_f * 3} = \frac{17900}{400 * 0,85 * 3} = 17,55A$$

Com a equação 6.3 passamos de corrente de fase para corrente de linha.

$$I_l = I_f * \sqrt{3} \quad (6.3)$$

Onde:

I_f é a corrente de fase, [A];
 I_l é a corrente de linha, [A].

Temos, então:

$$I_l = 17,55 * \sqrt{3} = 30,40A$$

Resistências de Aquecimento

Cada prato contém 3 resistências de 1,5kW de potência. Estas encontram-se ligadas entre uma fase e o neutro, suportando cada fase duas resistências. Pela equação 6.4:

$$P = V_f * I_f * P_f \quad (6.4)$$

Onde:

P é o valor de potência da resistência, [W];

V_f é o valor da queda de tensão aplicada à resistência, [V];

I_f é a corrente que passa na resistência, [A];

P_f é o fator de potência.

Tratando-se de resistências, pode ser assumido que o fator de potência será extremamente próximo de 1. Assim, temos, para cada resistência:

$$I_f = \frac{P}{V_f} = \frac{1500}{230} = 6,5A$$

Cada fase terá de fornecer, então 13A. O neutro receberá 39A, sendo este também o valor do consumo máximo de corrente das resistências de aquecimento, em conjunto.

Bombas de Linha

Da mesma maneira que se fez o cálculo para o conjunto motor/bomba da central hidráulica de alta pressão, visto estas bombas serem também ligadas em estrela, temos, pela equação 6.1:

$$I_f = \frac{P}{V_f * P_f * \eta * 3} = \frac{750}{230 * 0,85 * 0,75 * 3} = 1,7A$$

A placa das bombas, Figura 86, corrobora este cálculo, indicando um consumo de 1.7A.



Figura 86 – Placa com as características do motor das bombas de linha

6.1.2 Elementos Menores de Consumos

Fontes de 24V

A fonte original de 24V, usada na alimentação da placa de condicionamento de sinal para a válvula proporcional, Figura 87, é o modelo da hawa POWER SUPPLY 0806-2404-00-10.



Figura 87 – hawa POWER SUPPLY 0806-2404-00-10

Assim, com um *input* de 230V AC e uma potência aparente de 100VA, pela equação 6.4 temos:

$$P = V * I \quad (6.4)$$

Onde:

P_{ap} é o valor de potência aparente da fonte, [VA];

V é o valor da queda de tensão alimentação, [V];

I é a corrente consumida pela fonte, [A].

A fonte consome, então:

$$I = \frac{100}{230} = 0.4A$$

Para a nova fonte, Figura 55, pela sua ficha técnica, vemos que, com um *input* de 230V AC, o seu consumo nominal de corrente é de 2A.

Transformadores de 110V

O circuito de comando principal, usado para atuar os contactores de 110V que serão mantidos do sistema original, utiliza um transformador para fornecer os 110V AC necessários, modelo *legrand* Transformateur Machine-Outil 42674, Figura 88.



Figura 88 – Transformador *legrand* Transformateur Machine-Outil 42674

Com um *input* de 400V e uma potência aparente de 250VA, pela equação 6.4 temos:

$$I = \frac{250}{400} = 0.6A$$

Módulos de Condicionamento de Sinal

Pela ficha técnica destes módulos, cada módulo consome 50 a 200 mA, dependendo da carga da respetiva célula, sendo o seu consumo nominal 90 mA.

Assumindo o consumo máximo, os 4 módulos de condicionamento, alimentados a 230V AC, consomem 0.8A.

Controlador de Temperatura

Como foi mencionado no capítulo 4.1 e 4.4, aquando ocorrer uma nova atualização da prensa, com o objetivo de permitir o uso do termorregulador e das resistências de aquecimento para alcançar a temperatura de 400°C nos pratos, serão usados os controladores atuais como medida de segurança, garantindo que os pratos não ultrapassam uma dada temperatura.

Estes controladores são os controladores JUMO GmbH & Co. KG 7020318-2100-23, Figura 89.



Figura 89 – Controlador JUMO GmbH & Co. KG 7020318-2100-23

Com um *input* de 230V AC e uma potência aparente de 7VA, pela equação 6.4 temos um consumo de:

$$I = \frac{7}{230} = 0.03A$$

6.1.3 Distribuição dos Consumos pelas fases

Com os valores máximos que cada componente pode consumir, podemos definir as fases que irão alimentar estes componentes de maneira que o consumo de corrente entre cada fase esteja o mais equilibrado possível.

A Tabela 60 mostra os consumos e a sua distribuição pelas fases da alimentação trifásica da versão do sistema com o método mais simples de controlo de temperatura.

Tabela 60 – Consumos de corrente por fase do sistema mais simples

Fases	Consumo Máximo de Corrente [A]				
	Central Hidráulica	Termorregulador	Transformador	Fontes 24V	Total
L1	9,2	30,4	0,6		40.2
L2	9,2	30,4	0,6		40.2
L3	9,2	30,4	-----	2+0,4=2,4	42
N	-----	-----	-----	2+0,4=2,4	2.4

Por seu lado, a

Tabela 62 mostra o consumo total do sistema simples acrescentado do consumo das resistências de aquecimento, bombas de linha e dos controladores de temperatura que servirão de sistema de segurança para os pratos.

Tabela 61 –Consumos de corrente do sistema mais complexo possível, com as bombas de linha e resistências de aquecimento

Fases	Consumo Máximo de Corrente [A]				
	Sistema Simples	Resistências	Bombas de Linha	Controladores Temperatura	Total
L1	40.2	13	$2*1,7=3,4$	0,03	56,6
L2	40.2	13	$2*1,7=3,4$	0,03	56,6
L3	42	13	$2*1,7=3,4$	----	58,4
N	2.4	39	----	$2*0,03=0,06$	41,5

6.2 Organização do Quadro de Manobra

Com o processo de *retrofit* e a adição de novos elementos de controlo, foi decidido, como foi mencionado na Tabela 36, que os novos componentes seriam instalados num novo quadro de manobra, sofrendo o quadro original o mínimo de alterações necessárias à realização do *retrofit*.

A Figura 90 mostra o quadro de manobra original.

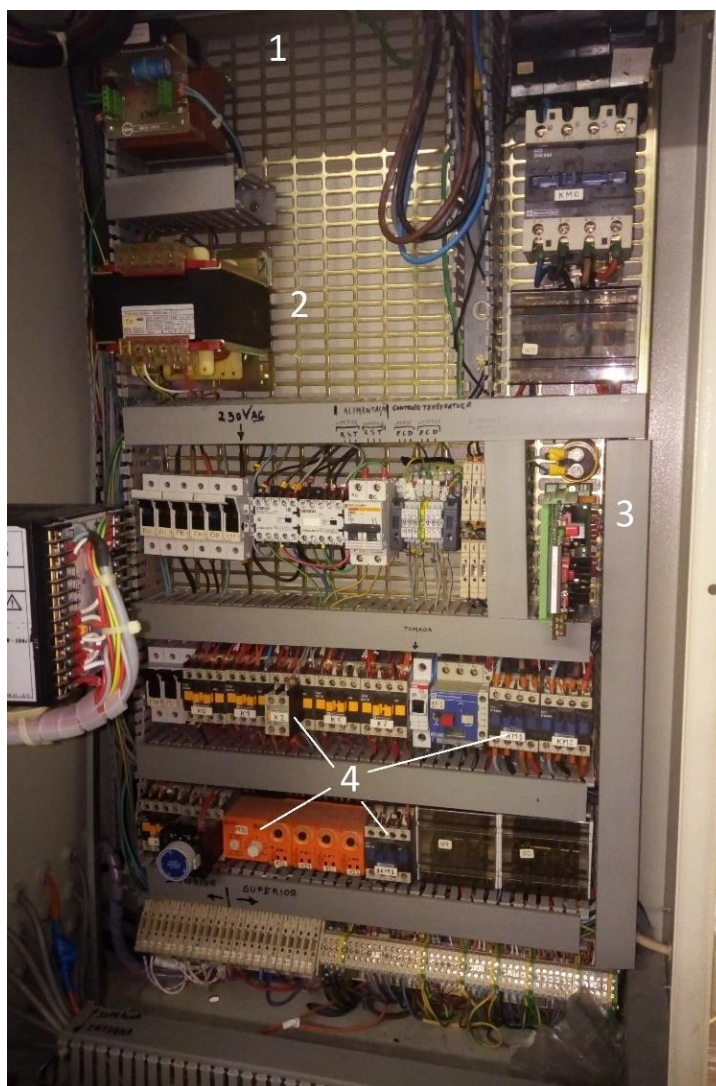


Figura 90 – Quadro de manobra original

Destes componentes, serão mantidos a fonte original de 24V (1), o transformador de 110V (2), a carta de controlo da válvula proporcional (3) e diversos contactores de 110V, mantendo também os temporizadores que garantem a simultaneidade de atuação do comando bi-manual. Os outros elementos do quadro serão substituídos por componentes novos, mas funcionalmente iguais.

A Figura 91 mostra a organização do novo quadro de manobra e a legenda dos componentes inseridos neste encontra-se na

Tabela 62. A caixa de manobra será arrefecida através da forçagem de ar para o seu interior, criando assim uma zona de pressão positiva, ajudando a manter os componentes eletrónicos a salvo das partículas de carbono presentes na atmosfera do laboratório. Esta nova caixa será fixada na zona traseira da caixa de manobra original, estando assim dentro da zona de segurança interdita.

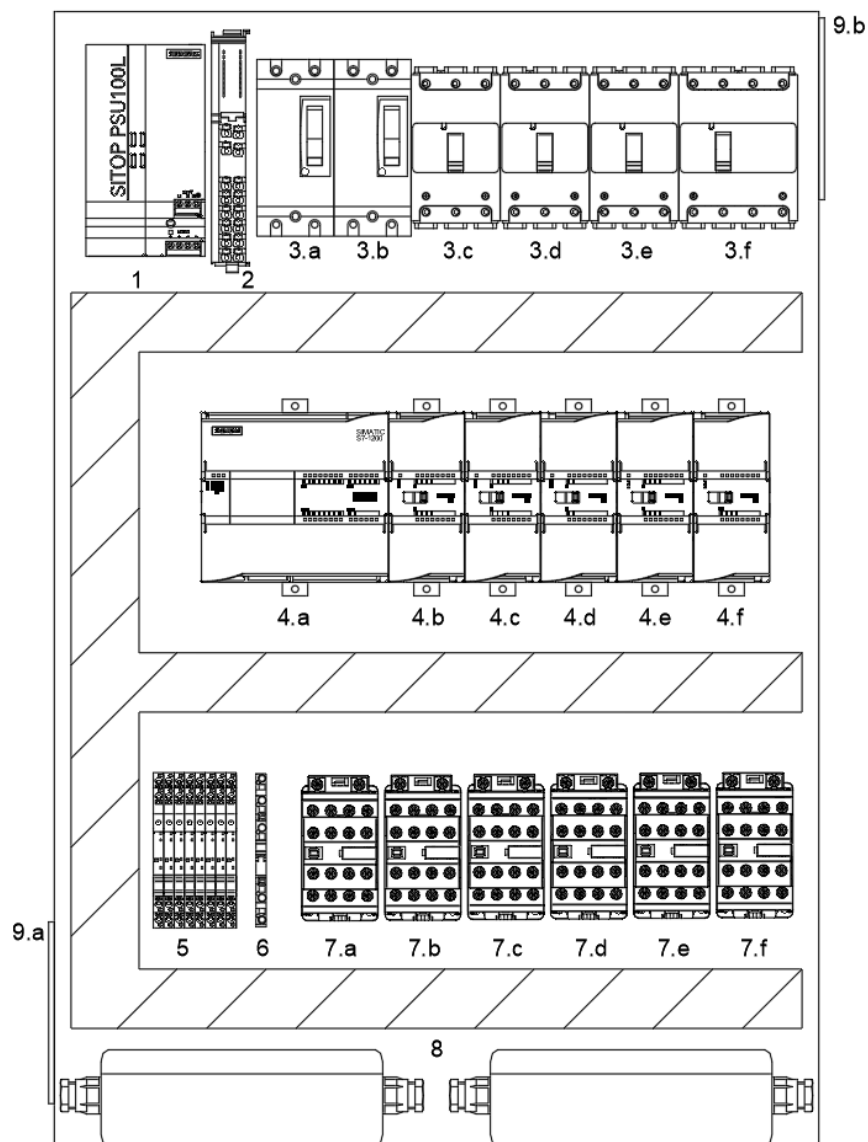


Figura 91 – Esquema da organização do novo quadro de manobra

Os esquemas elétricos podem ser visualizados no Anexo B.

Tabela 62 – Legenda dos componentes no novo quadro de manobra

Componente		Designação
1		Fonte 24V SITOP PSU100L
2		Módulo de Segurança SICK RLY3-EMSS100
3	a	Disjuntor de 2 polos. Transformador (400V para 110V)
	b	Disjuntor de 2 polos. Fontes de 24V
	c	Disjuntor de 3 polos. Central hidráulica
	d	Disjuntor de 3 polos. Termorregulador.
	e	Disjuntor de 3 polos. Bombas de linha.
	f	Disjuntor de 4 polos. Resistências de aquecimento.
4	a	SIEMENS PLC SIMATIC S7-1200
	b	SM 1231 8TC
	c	SM 1231 8TC
	d	SM 1231 4TC
	e	SM 1231 8AI
	f	SM1232 4AO
5		Contactores de 24V
6		Conversor DC-DC (24V – 10V)
7	a	1º Contactor de Segurança do Módulo de Segurança
	b	2º Contactor de Segurança do Módulo de Segurança
	c	Contactor de Segurança da Central Hidráulica
	d	Contactor de Segurança do Termorregulador
	e	Contactor de Segurança das Bombas de Linhas
	f	Contactor de Segurança das Resistências de Aquecimento
8		Módulos de Condicionamento de Sinal das Células de Carga
9	a	Entrada de Ar de Arrefecimento
	b	Saída de Ar de Arrefecimento

7 Validação dos Controladores de Processo

7.1 Controlador de Força

7.1.1 Setup e Estimação dos Parâmetros de Controlo

Como descrito na secção 5.2.3 a solução de controlo utilizada para o controlo da força nos pratos baseou-se num controlador PID integrado no PLC. Assim, utilizando o *feedback* fornecido pelas células de carga, este controlador variará a tensão aplicada à válvula proporcional e, consequentemente, a força nos pratos, por meio da pressão aplicada no cilindro hidráulico. A prensa apresenta uma pressão mínima, definida pela sua carta de controlo e já no seu limite inferior, que se traduz numa força que ronda os 20kN, sendo este valor influenciado por fatores externos de difícil previsão.

De modo a não interferir com outros projetos que decorriam em paralelo, e que necessitavam da prensa funcional, não foi possível realizar a instalação de todo o sistema, como descrito no capítulo 4.2. Os testes do controlo de força foram realizados usando uma única célula de carga, localizada no centro dos pratos, de forma semelhante ao teste realizado no capítulo 3.2.

De acordo com os procedimentos indicados no bloco PID, foi definido que a variável a controlar era do tipo “força”, assim como a sua gama de variação e ativado a capacidade anti *wind up* do controlador. Para além disto, e para garantir que a célula de carga não era danificada, foi definido que esta ação de controlo estaria limitada a 60%, querendo isto dizer, que a prensa aplicaria um máximo de 120kN. Também para garantir a segurança do sistema e do operador, foi introduzido, na programação do controlador, um bloco limitador da taxa de variação da sua ordem de controlo (sendo este bloco antecipado e reconhecido pelo PID no software), servindo como uma medida de segurança redundante, visto a carta de controlo também realizar esta função. Desta maneira, foi assim garantido que o sistema não sofreria variações bruscas da pressão induzidas pelo controlador.

Estando estes passos completo, foi possível realizar o auto ajuste dos parâmetros do controlador PID, que funciona seguindo a equação 7.1. Este controlador pode também ser representado pelo diagrama da Figura 92.

$$y = K_p \left[(b * w - x) + \frac{1}{T_I * s} (w - x) + \frac{T_D * s}{a * T_D * s + 1} (c * w - x) \right] \quad (7.1)$$

Onde:

K_p é o ganho proporcional, [%/N];
 s é o operador de Laplace;
 b é o peso do *setpoint* na ação proporcional;
 w é o *setpoint*;
 x é o *feedback* do valor a controlar;
 T_I é o tempo integral [s];
 a é o valor do coeficiente do filtro da ação derivativa;
 T_D é o tempo derivativo [s];
 c é o peso do *setpoint* na ação derivativa.

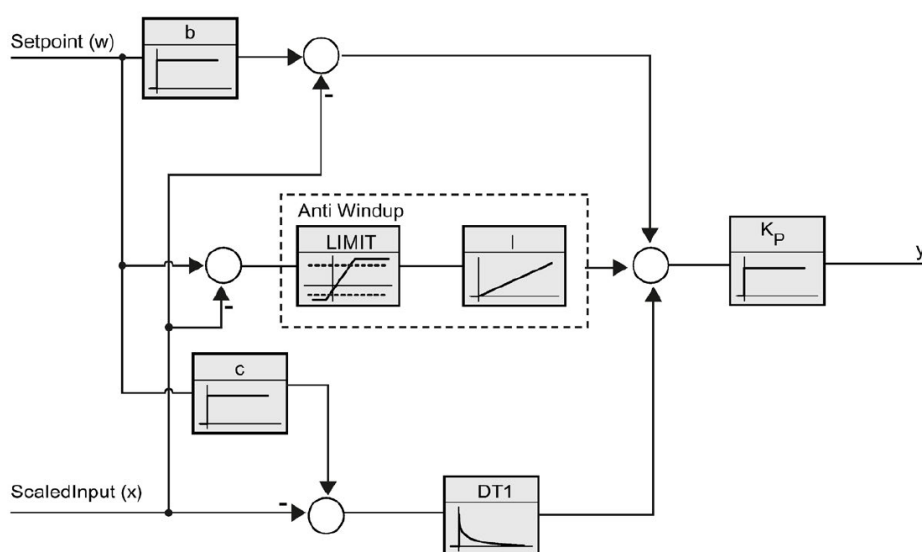


Figura 92 – Diagrama representativo do controlador PID usado pelo PLC (SIEMENS 2019)

O processo de estimação dos parâmetros foi finalizado com sucesso e os valores obtidos podem ser observados na Tabela 63.

Tabela 63 – Parâmetros do controlador PID de força

Parâmetro	Valor
Ganho Proporcional, K_p ,	1,104452E-2 %/N
Tempo Integral, T_I	1,449498 s
Tempo Derivativo, T_D	3,670222E-2 s
Coeficiente do filtro da ação derivativa, a	0,1
Peso do <i>setpoint</i> na Ação Proporcional, b	2,5614963E-1
Peso do <i>setpoint</i> na Ação Derivativa, c	0.0
Período de Amostragem do Algoritmo	9,99977E-2 s

Com estes parâmetros, foram então realizados um conjunto de testes para avaliar a sua qualidade. Primeiro, foi testada a resposta ao degrau, tendo sido realizados três testes, um com um degrau de 30000N, um segundo de 55000N e um terceiro de 80000N.

De seguida foi testada a resposta a uma solicitação em rampa, tendo sido realizados três testes para uma solicitação com um declive de 1000N/s, até 50000N, 75000N, e 100000N e três testes para uma solicitação com um declive de 2000N/s, até 50000N, 75000N e 100000N. Para finalizar, foi realizado um teste de resposta a uma solicitação em rampa, com um declive de 1000N/s, e vários patamares de força. Os testes realizados estão sumarizados na Tabela 64.

Tabela 64 – Parâmetros dos testes realizados para avaliar a qualidade do controlador de força

Teste	Solicitação	Declive [N/s]	Patamar de Força [N]
1	Degrau	N/A	50000
2			75000
3			100000
4	Rampa	1000	50000
5			75000
6			100000
7		2000	50000
8			75000
9			100000
10	Rampa/Degrau	1000	Vários

7.1.2 Resposta ao Degrau

As respostas às solicitações em degrau podem ser observadas na Figura 93, Figura 94 e Figura 95.

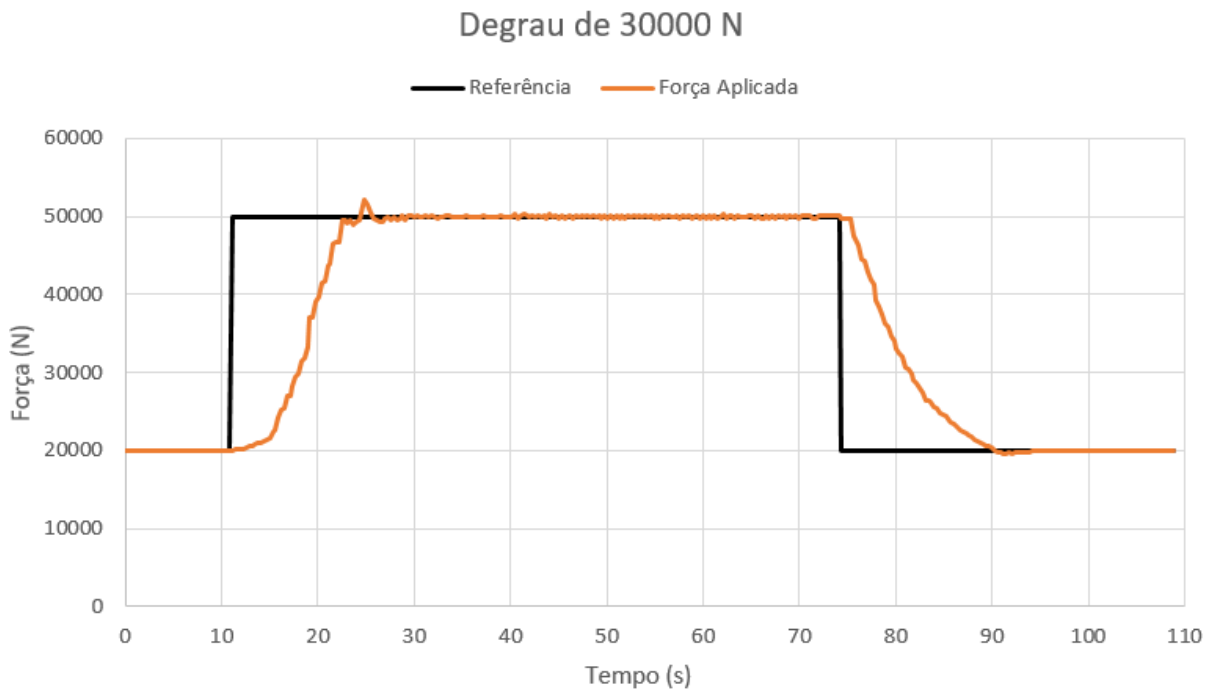


Figura 93 – Resposta do sistema a um degrau de 30000N

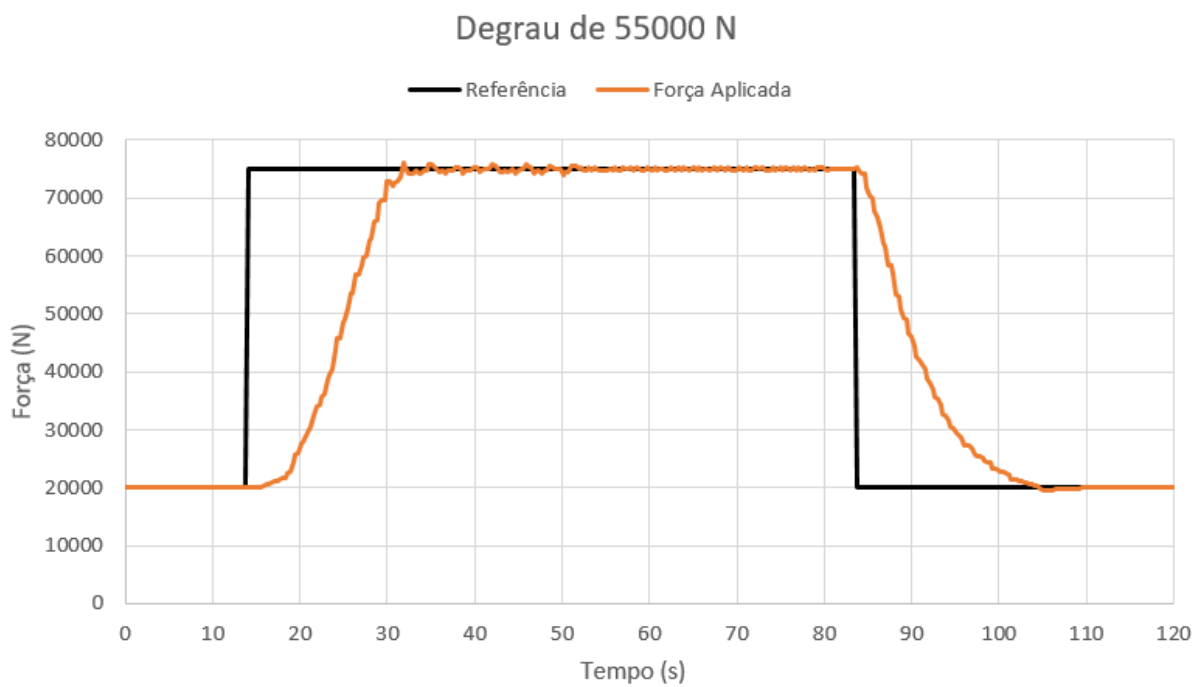


Figura 94 – Resposta do sistema a um degrau de 55000N



Figura 95 – Resposta do sistema a um degrau de 80000N

Tabela 65 – Taxas de variação e erros absolutos médios das respostas ao degrau do sistema

Teste	Taxa de Variação Média na Subida [N/s]	Taxa de Variação Média na Descida [N/s]	Erro Absoluto Médio no Patamar [N]
1	3640	-2370	136
2	4420	-3610	259
3	5110	-4600	279

Podemos observar, pela análise destes gráficos, que o sistema apresenta uma evolução inicial da resposta à solicitação relativamente lenta. É provável que este comportamento se deva à limitação da taxa de variação implementado na carta de controlo, sendo esta superior à implementada na programação do PLC, sendo decidido, por razões de segurança, não alterar este parâmetro, mantendo-o no seu valor original. Possivelmente, a central hidráulica estará a causar esta lentidão na resposta, através da demora na variação de cilindrada da bomba.

Pode-se observar ainda que o erro médio absoluto sofre uma subida quanto maior for o degrau, sendo que este erro não é considerado significativo para o uso atual da prensa. A taxa média de variação também mostra um aumento significativo com o aumento do degrau, sendo que este comportamento é o esperado de um sistema linear, não saturado.

O sistema estabiliza no patamar muito rapidamente após o alcançar, tendo valores de *overshoot* aceitáveis. Mostra, assim, como sendo um controlador satisfatório para as necessidades laboratoriais da UMEC, no que toca à resposta a degrau.

7.1.3 Resposta à Rampa

As respostas às solicitações em rampa com um declive de 1000 N/s podem ser observadas na Figura 96, Figura 97 e Figura 98

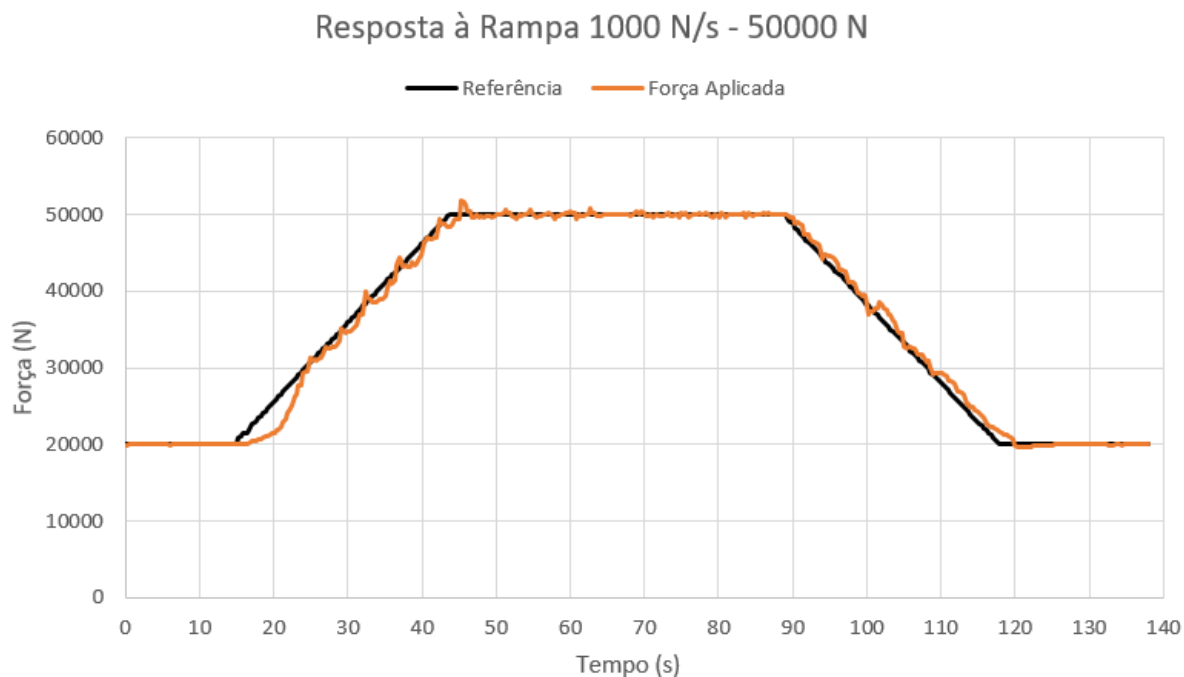


Figura 96 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e patamar de 50000N

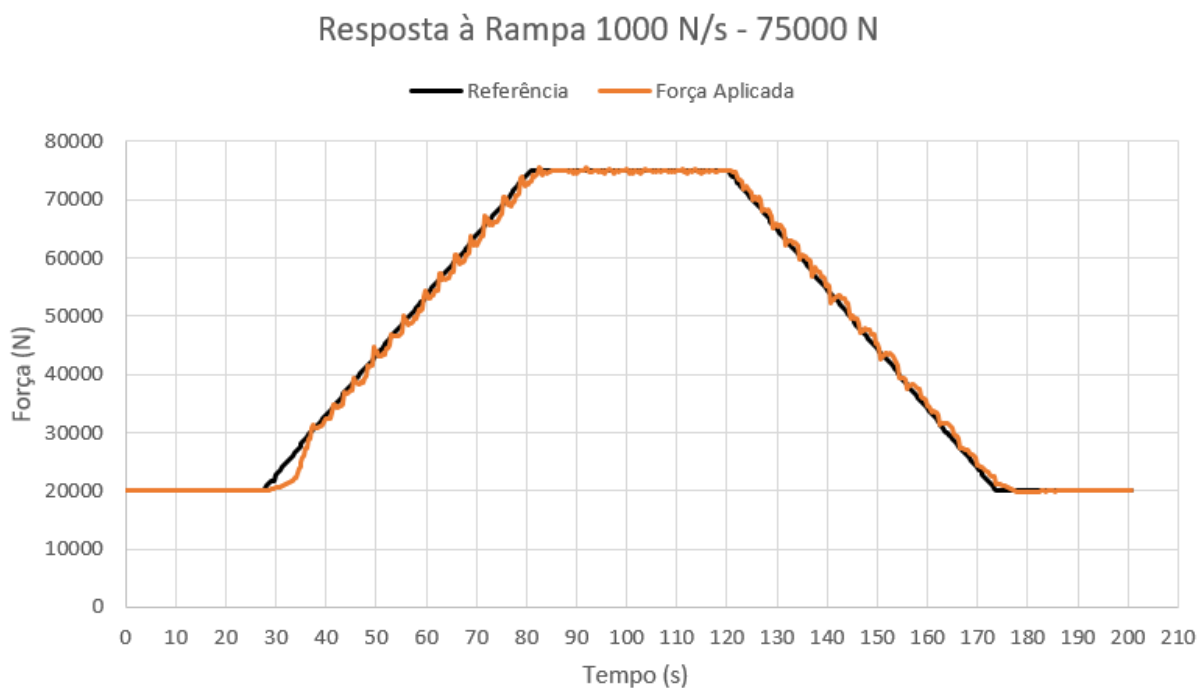


Figura 97 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e patamar de 75000N

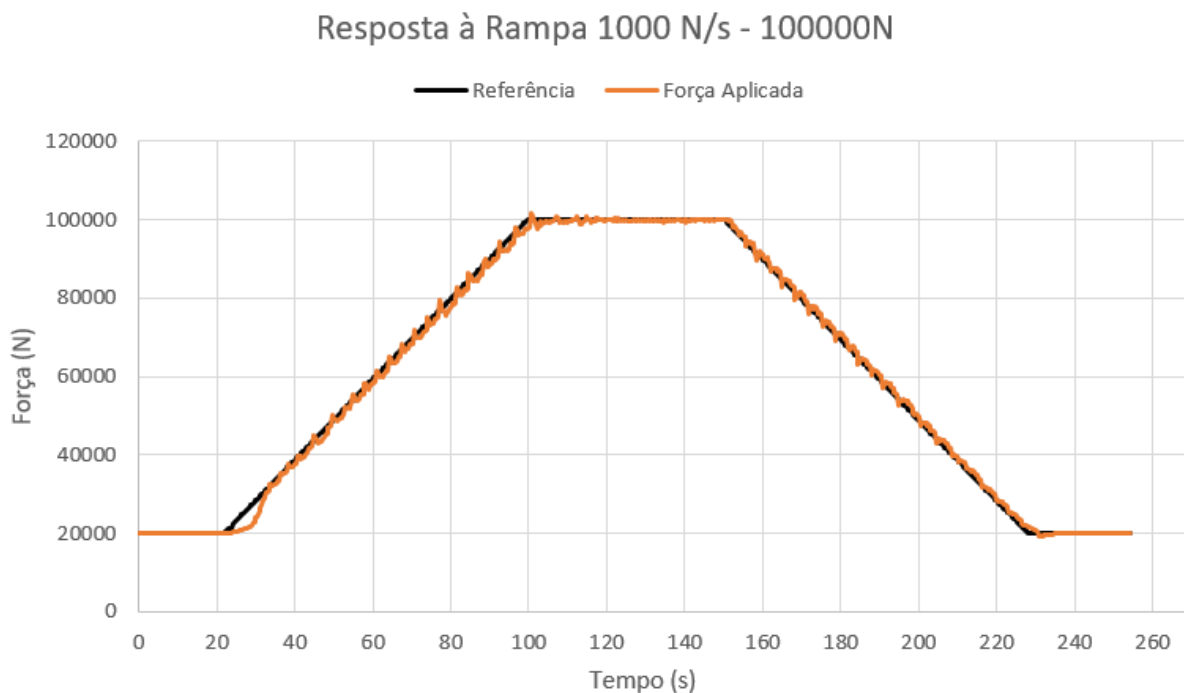


Figura 98 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e patamar de 100000N

Tabela 66 – Erro absoluto médio após 10s para as solicitações em rampa de 1000N/s

Teste	Erro Absoluto Médio [N], $t > 10s$
4	523,67
5	678,87
6	860,55

Como se pode observar pelos gráficos da Figura 96, Figura 97 e Figura 98, o mesmo comportamento na resposta inicial ocorre na solicitação em rampa, sendo que esta demora aproximadamente 10 segundos a alcançar a referência. Foram assim calculados os erros absolutos médios para estas curvas após estes 10 segundos, estando os resultados listados na Tabela 66. Este erro parece sofrer um ligeiro aumento com o aumento do patamar, não sendo, mesmo assim, considerável.

Podemos também observar que, durante as solicitações em rampa, a resposta apresenta um comportamento em ondas, mostrando o efeito do *stick-slip*. Para melhorar esta resposta sugere-se a substituição dos vedantes do cilindro por uns de baixo atrito.

Foram ainda realizados mais três testes à solicitação em rampa, como foi explicado, com um declive de 2000 N/s, para melhor analisar o efeito da resposta inicial à solicitação, utilizando um maior declive, podendo os resultados destes serem visualizados na Figura 99 e Figura 100.

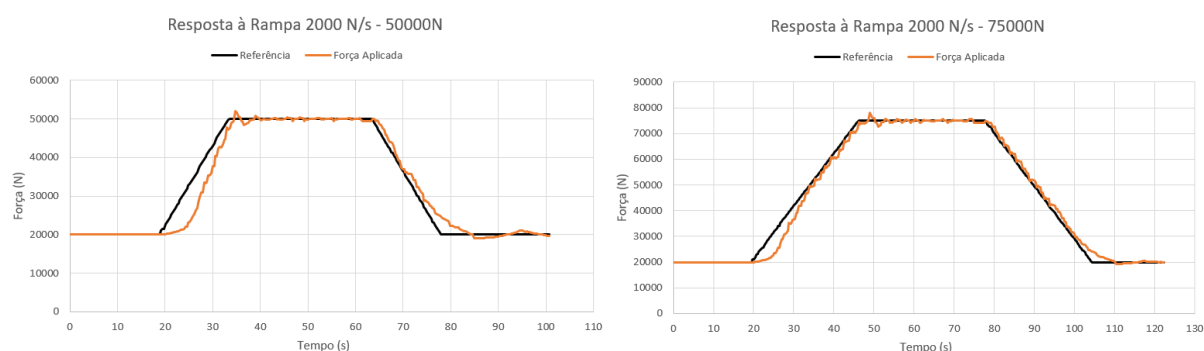


Figura 99 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 2000N/s e patamar de 50000N (esquerda) e patamar de 75000N (direita)

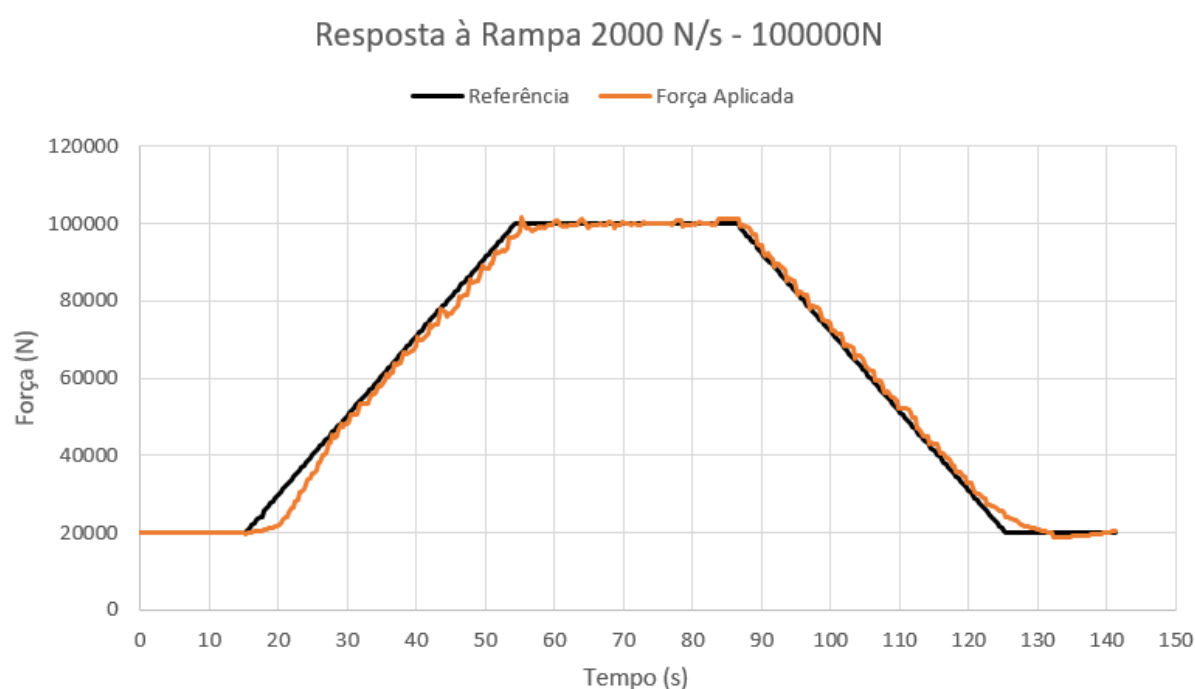


Figura 100 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 2000N/s e patamar de 100000N

Podemos então observar que, com um maior declive combinado com um menor patamar de força, este efeito inicial pode causar problemas no acompanhamento da solicitação. Na Figura 99 (esquerda) podemos ver que o comportamento se assemelha à resposta em degrau para o mesmo patamar. Na mesma figura, à direita, e na Figura 100, após alcançar a linha de referência o sistema tem uma resposta semelhante à resposta à solicitação com declive de 1000N/s. Os erros para estas duas solicitações, após ter sido alcançado o acompanhamento da referência, estão na Tabela 67.

Tabela 67 – Erro absoluto médio após a interseção com a linha de referência para a solicitação em rampa de 2000N/s e patamar de 75000 e 100000N

Teste	Erro Absoluto Médio [N]
8	1130,45
9	1490,30

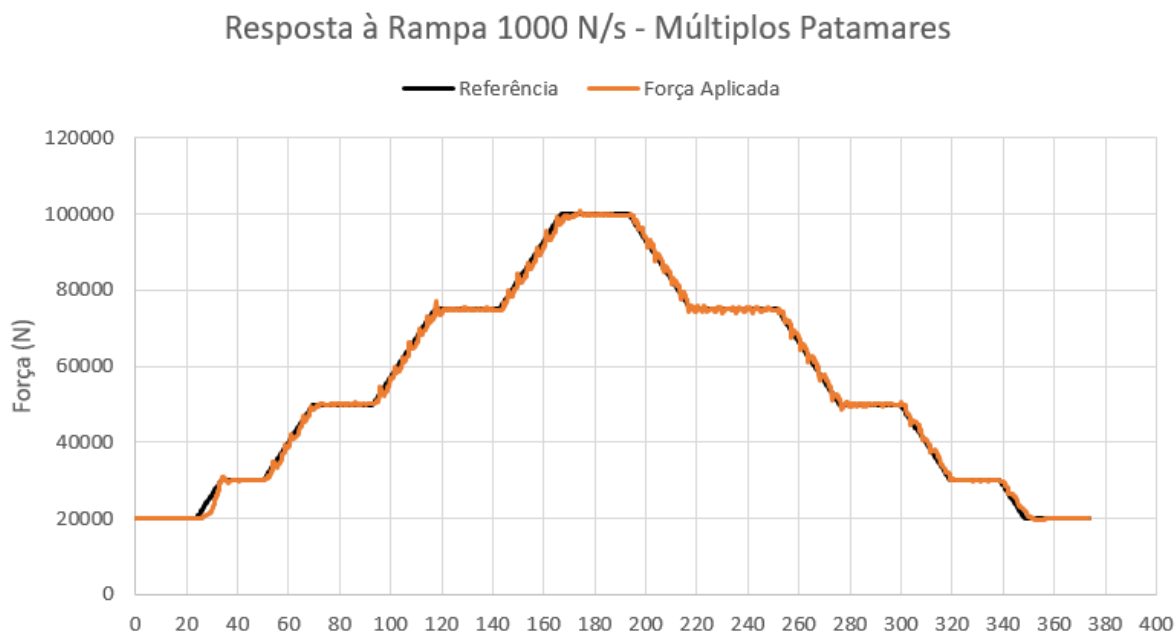


Figura 101 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de 1000N/s e vários patamares

O gráfico da Figura 101 mostra o teste realizado com vários patamares e várias solicitações em rampa, com declive igual a 1000N/s. Este teste mostra que a lentidão inicial na reação do sistema, aparentemente, só se verifica em torno dos valores da força mínima controlável pelo grupo hidráulico, tanto na subida, como na descida. Este efeito pode ser visualizado nas respostas à rampa, nomeadamente na Figura 100, fortalecendo assim a hipótese de este comportamento se dever às dinâmicas da central hidráulica.

O controlador obtido mostra-se capaz de seguir de modo fiável as curvas de referência definidas, independentemente do patamar em que se encontra, com um efeito de *stick-slip* que poderá, eventualmente, ser colmatado pela substituição dos vedantes do cilindro, como referido acima.

Em solicitações de declive maior com baixos patamares a resposta inicial pode ainda causar problemas significativos, sendo que, no uso pretendido, os declives das rampas de força nunca serão acima dos 1000N/s.

7.2 Controlador de Temperatura

7.2.1 Setup e Estimação dos Parâmetros de Controlo

Como descrito na secção 5.2.3, a solução de controlo inicial baseou-se num controlador PID que, a partir da temperatura média dos pontos centrais de cada prato e o *setpoint* desejado, enviaria uma referência de temperatura para o termorregulador.

Seguindo os procedimentos de instalação indicados no manual do termorregulador, foi inicialmente realizada uma purga do sistema de distribuição de fluído usando ar pressurizado, de forma a garantir que este não continha vestígios de água. Foram também realizadas as ligações necessárias aos terminais do controlador MP-888, para que este recebesse a ordem de controlo através de uma referência exterior.

Para a estimação dos parâmetros de controlo, foi realizado um auto ajuste dos mesmos, de acordo com os procedimentos indicados no bloco PID implementado no PLC. Definiu-se que a variável a controlar é do tipo “temperatura”, assim como a sua gama de variação, em função dos limites físicos de funcionamento da prensa. No entanto, o bloco de auto ajuste não foi capaz de chegar a um conjunto de parâmetros. Para simplificar a estrutura do controlador, tendo em conta que as dinâmicas do sistema são lentas, retirou-se a ação derivativa, passando para um controlador PI. Repetindo o procedimento de auto ajuste, foi então possível chegar a um conjunto de parâmetros grosseiros, dada a incapacidade de o sistema fazer um ajuste fino dos mesmos. Após alguns testes, os parâmetros preliminares alcançados foram considerados insuficientes, sendo a resposta do sistema extremamente lenta e os seus valores de *overshoot* e *undershoot*, também, muito elevados.

Foi então decidido fechar a malha de controlo diretamente no termorregulador. Deste modo, a temperatura central média dos pratos é fornecida diretamente ao controlador MP-888, que usa também um controlador do tipo PID, implementado no equipamento.

Realizaram-se 4 testes para avaliar a qualidade de controlo desta estratégia, duas solicitações em degrau, de 100°C e 175°C, e duas solicitações em rampa até 150°C, uma com um declive de 2°C/min e outra com declive de 4°C/min. Não foram realizados testes a temperaturas mais elevadas por questões de segurança, visto o sistema de distribuição do termofluído não ter sido completamente atualizado para aguentar com as novas temperaturas e existir a possibilidade de alguns dos seus componentes falharem.

As características dos testes realizados estão resumidas na Tabela 68, sendo que todos foram iniciados com os pratos e o fluído térmico a uma temperatura próxima de 50°C.

Tabela 68 – Parâmetros dos testes realizados para avaliar o controlo de temperatura através do termorregulador

Teste	Solicitação	Temperatura [°C]	Declive [°C/min]
1	Degrau	100	N/A
2		175	N/A
3	Rampa	150	2
4			4

7.2.2 Resposta ao Degrau

As respostas às solicitações em degrau podem ser visualizadas na Figura 102, para o degrau de 100°C e na Figura 103 para o degrau de 175°C e alguns detalhes na Tabela 69 e Tabela 70.

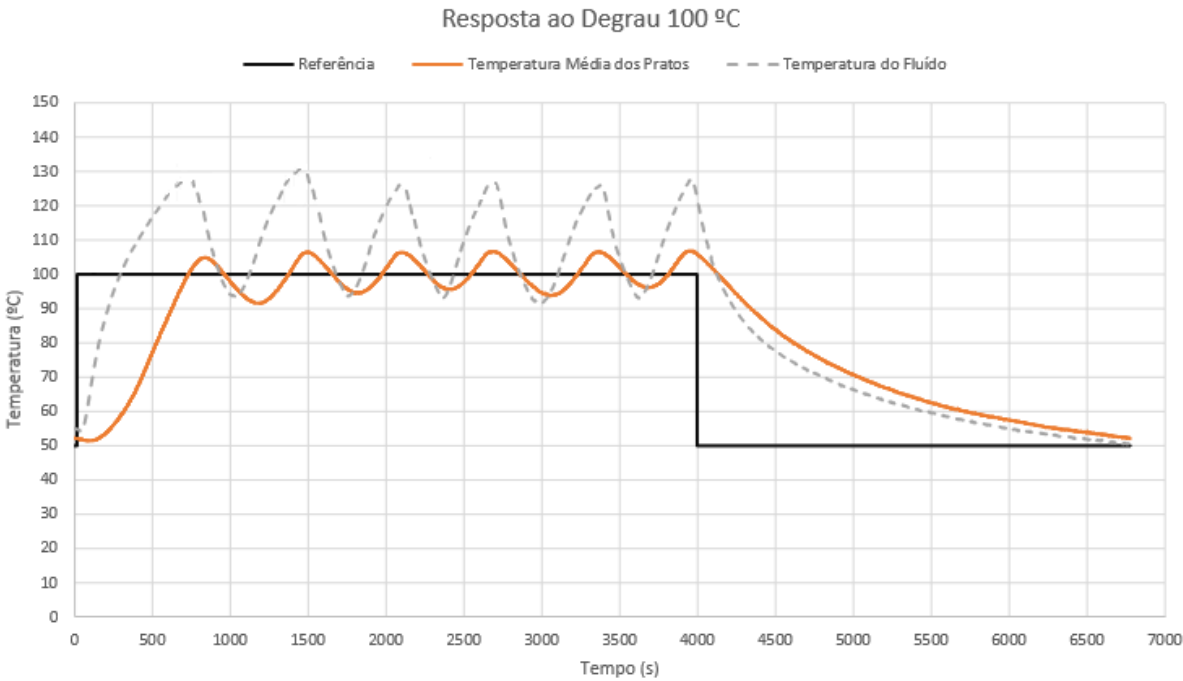


Figura 102 – Resposta do sistema a um degrau de 100°C

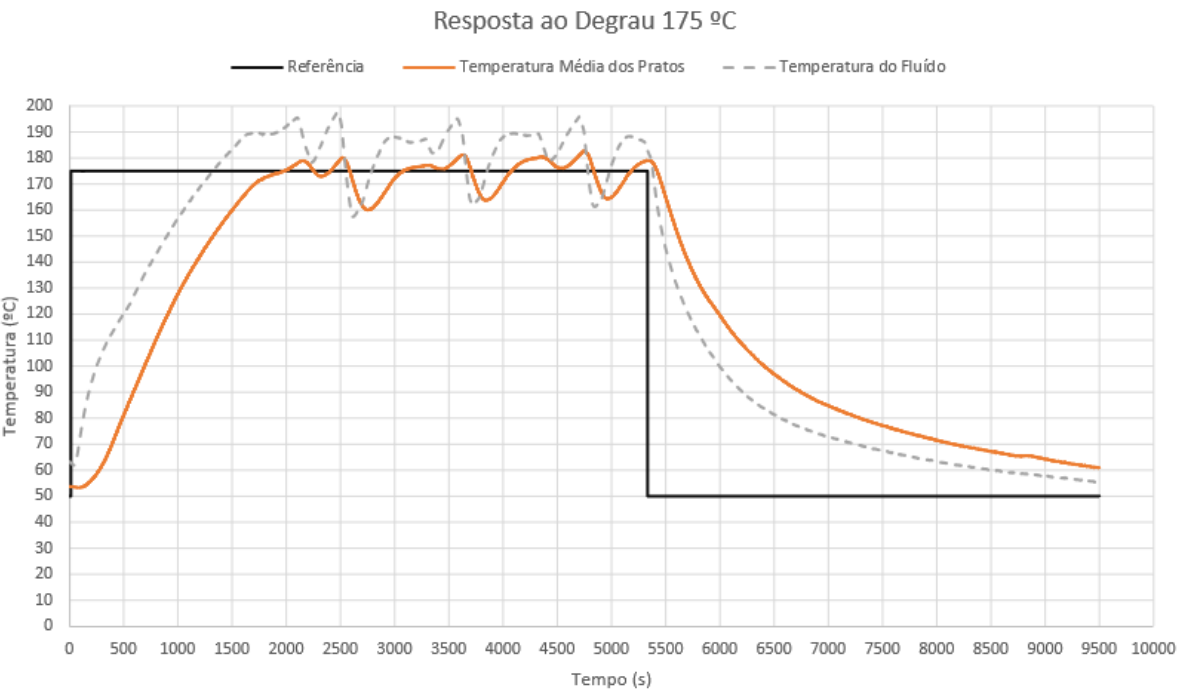


Figura 103 – Resposta do sistema a um degrau de 175°C

Tabela 69 – Taxas médias de aquecimento e arrefecimento na resposta ao degrau

Degrau [°C]	Tempo até alcançar o Setpoint [s]	Taxa Média de Aquecimento [°C/min]	Taxa Média de Arrefecimento [°C/min]	
			T > 100°C	T < 100°C
100	735	5,81	N/A	1,13
175	1960	4,15	4,37	0,78

Tabela 70 – Overshoot e Undershoot nas respostas ao degrau

Degrau [°C]	Overshoot [°C]	Undershoot [°C]
100	6,20	9,10
175	6,50	15

Em primeiro lugar, pode ser observado, em ambos os gráficos de resposta obtidos, a existência de uma resposta inicial à ação de controlo lenta, possivelmente resultante da inércia térmica imposta pelos pratos. Vemos também, no decorrer de todo o teste, um desfasamento natural entre a temperatura dos pratos (variável controlada) e a temperatura do termofluido. Pode-se também observar que acima dos 100°C a taxa de arrefecimento chega a ser 5 vezes superior que abaixo desta temperatura. A taxa de aquecimento aparenta diminuir, como seria de esperar, com o aumento do *setpoint*, sendo que não se verificam alterações significativas no *overshoot* com este aumento.

De seguida, pode ser observado que a temperatura dos pratos não estabiliza no patamar definido, ficando a oscilar de forma periódica. Este comportamento pode ser avaliado por meio da quantificação do *overshoot* e do *undershoot* resultantes, Tabela 70. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de o controlador integrado no termorregulador não estar devidamente ajustado para um atraso entre a variação da temperatura do fluido e a temperatura dos pratos como a existente. Além disso, o controlador utiliza, para além do PID uma banda de controlo em torno do *setpoint*. Se a temperatura monitorizada, neste caso a dos pratos, sair fora desta banda, é realizada uma ação de aquecimento ou arrefecimento extrema. Este comportamento pode ser visualizado no gráfico da Figura 103, onde se evidencia um *undershoot* periódico, com amplitude superior aos demais.

Esta oscilação de temperatura, nos pratos da prensa, não é de todo desejável para a aplicação em causa. Eventualmente, poderá ser minimizada alterando a banda de controlo do termorregulador ou a intensidade das ações de arrefecimento e aquecimento, sendo, ainda assim, necessários mais testes para alcançar mais conclusões. Ainda assim, é esperado que a solução de controlo de temperatura completa, como descrita na secção 4.1 traga resultados muito mais satisfatórios.

7.2.3 Resposta à Rampa

As respostas às solicitações em rampa podem ser visualizadas na Figura 104, para a rampa com declive de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e na Figura 105 para rampa com declive de $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A Tabela 71 apresenta os erros absolutos médios obtidos durante a rampa de aquecimento e arrefecimento.

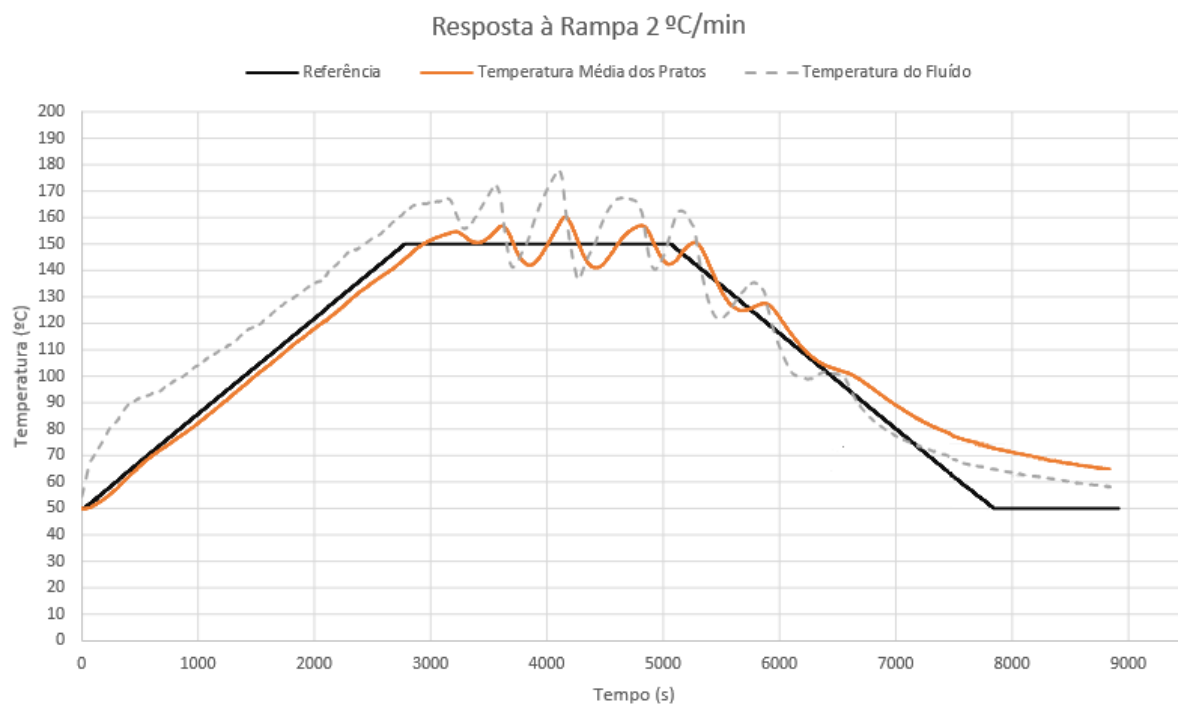


Figura 104 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$

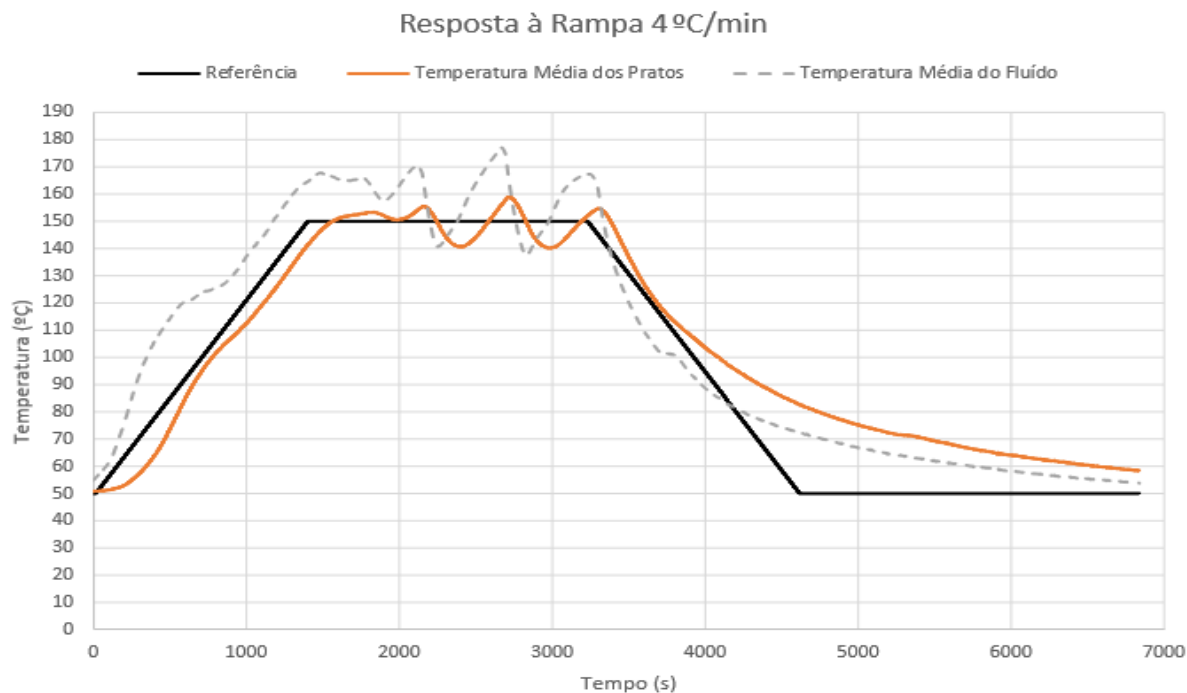


Figura 105 – Resposta do sistema a uma solicitação em rampa com declive de $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Tabela 71 – Erro Absoluto Médio no seguimento das rampas de aquecimento e arrefecimento

Rampa	Erro Absoluto Médio [°C]		
	Aquecimento [°C]	Arrefecimento [°C]	
		T > 100°C	T < 100°C
2 °C/min	3,36	2,42	10,78
4 °C/min	8,50	6,56	21,50

Para o cálculo do erro absoluto médio (EAM), no decorrer da solicitação à rampa, foi utilizada a equação 7.2.

$$EAM = \frac{\sum_{i=n}^m |T_{pi} - T_{si}|}{m-n} \quad (7.2)$$

Onde:

- EAM é o erro absoluto médio, [°C];
- n é o indicador da amostra inicial da rampa;
- m é o indicador da amostra final da rampa;
- T_{pi} é a média das temperaturas centrais dos pratos, [°C];
- T_{si} é a temperatura de *setpoint* desejada.

Pela análise dos gráficos da resposta a uma solicitação em rampa, podemos ver que este consegue seguir relativamente bem a curva da referência de controlo, apresentando uma maior dificuldade inicial em seguir a solicitação, com um declive de 4°C/min, devido ao já mencionado atraso do início do aquecimento, estabilizando de seguida, ainda que com um erro em relação ao *setpoint* mais elevado. Assim, pode ser concluído que um aumento da taxa de variação causará um aumento no erro absoluto médio durante a fase em rampa da solicitação, sendo este comportamento típico e esperado do sistema.

Pode-se também notar, quer nas respostas à rampa, quer na resposta ao degrau de 175°C, que a capacidade de arrefecimento diminui drasticamente abaixo dos 100°C, (como foi mencionado anteriormente, acima dos 100°C a taxa de arrefecimento pode ser 5 vezes superior) não conseguindo o sistema seguir a rampa definida em nenhum dos casos de solicitação quando alcançada esta temperatura. Este facto não é um problema considerável, visto que, no arrefecimento de placas compósitas, as taxas de arrefecimento normalmente usadas são extremamente lentas.

Este controlador, devido às oscilações de temperatura durante os patamares das solicitações, e mais particularmente a taxa de variação destas oscilações, mostra então um comportamento não desejável para a aplicação realizada pela prensa, apesar de apresentar um bom comportamento no seguimento de solicitações em rampa. Será necessário realizar mais testes para melhor analisar a capacidade de suavizar estas oscilações, sendo que também se poderá partir para a solução descrita na secção 4.1, ou seja, o sistema completo de controlo de temperatura em que o termorregulador apenas controla a temperatura do óleo contido num reservatório.

7.3 Controlador de Posição

7.3.1 Setup e Estratégia de Controlo

Como descrito na secção 4.3.1 e 5.2.3, foi usado um transdutor de deslocamento linear e o PLC para controlar e monitorizar a posição do prato inferior da prensa. O transdutor foi fixado à estrutura principal do equipamento, na sua zona inferior. A ligação ao prato é realizada através de uma rótula, sendo este capaz de absorver alguns desvios que possam existir.

Não sendo possível, com esta solução, realizar um controlo fino da posição dos pratos, e após as verificações especificadas na secção 4.3.1, determinou-se, com os elementos da UMEC, que numa fase inicial, um controlo de posicionamento de 100 em 100mm era suficiente para facilitar o empilhamento das placas compósitas, sendo este o objetivo a confirmar com este teste.

O teste em si consistiu no deslocamento, iniciando o movimento na posição superior (posição $x = 0\text{mm}$, como se pode ver na Figura 106) do prato para a posição $x = 200\text{mm}$ (fase 1) e, de seguida, para a posição $x = 100\text{mm}$ (fase 2). Assim foi possível observar as dinâmicas de aceleração e desaceleração do sistema, em ambos os sentidos do movimento.

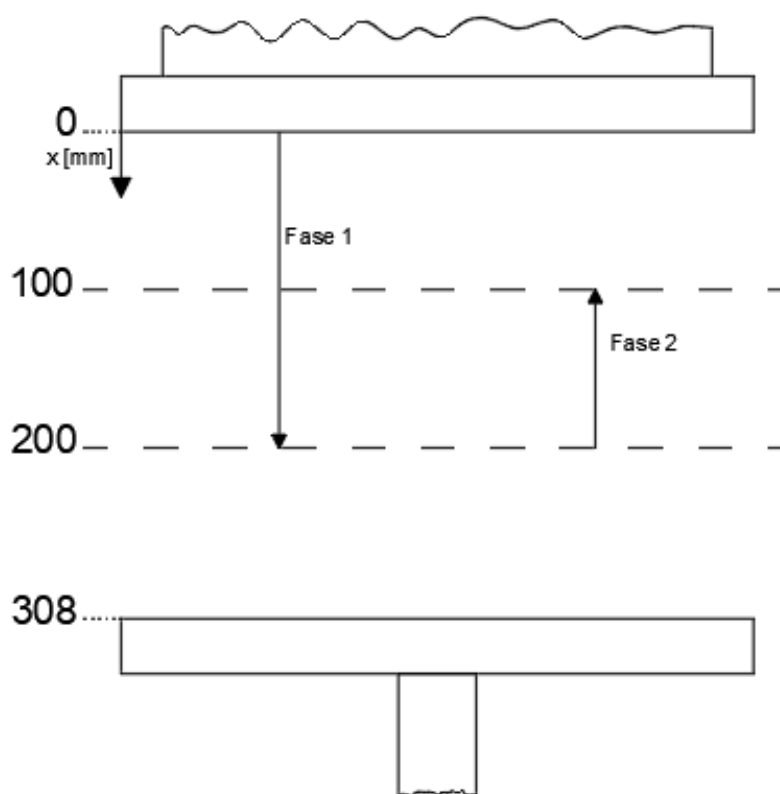


Figura 106 – Esquema do posicionamento do prato inferior durante os testes de validação

Como descrito na secção 5.2.3, o comportamento de controlo de posição basear-se-á na atuação da válvula direcional, até que o prato se encontre na posição desejada.

7.3.2 Resultados

Antes de se realizar os testes de posição, foi efetuada uma deslocação total do prato através de todo o seu percurso, estando os dados reunidos na Figura 107 e Tabela 72.

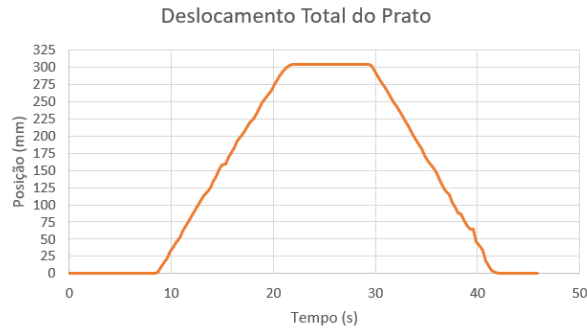


Figura 107 – Gráfico do movimento total do prato

Tabela 72 – Velocidades médias e tempos de transladação do prato

Movimento	Velocidade Média [mm/s]	Tempo de Chegada [s]
Descida do Prato	19,54	15,6
Subida do Prato	24,78	12,3

Após isto foram realizados 4 testes da maneira descrita na secção 7.3.1. Os resultados destes testes, onde o *setpoint* para a ordem de paragem é dado pela equação 7.3, são apresentados na Figura 108 e Tabela 73.

$$S_{[d,s]} = P_{[d,s]} \quad (7.3)$$

Onde:

$S_{[d,s]}$ é o novo *setpoint*, sendo d representativo da descida e s da subida, [mm];

$P_{[d,s]}$ é a posição pretendida, [mm].

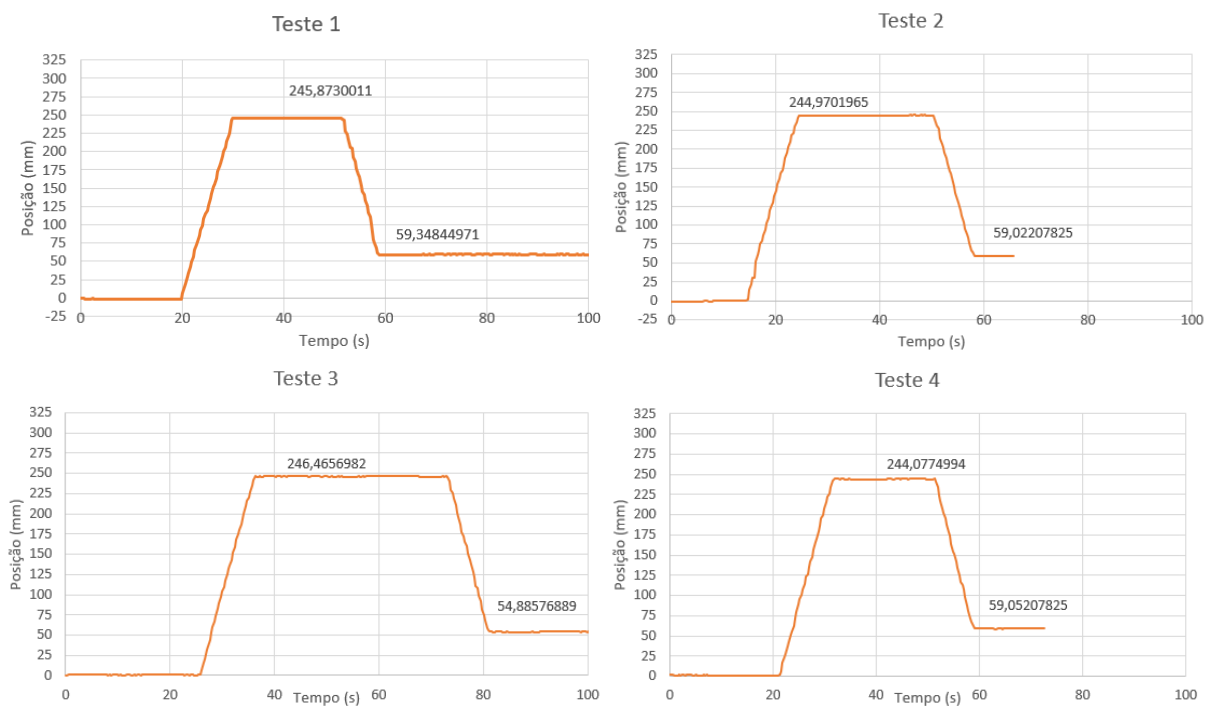


Figura 108 – Testes de controlo de posição realizados

Tabela 73 –Posições alcançadas e erros obtidos nos testes de posição

Teste	Sentido de Movimento	Posição Alcançada [mm]	Erro Absoluto [mm]
1	Descida	245,87	-45,87
	Subida	59,35	40,65
2	Descida	244,97	-44,97
	Subida	59,02	40,98
3	Descida	246,47	-49,47
	Subida	54,89	45,11
4	Descida	244,08	-44,08
	Subida	59,05	40,95

É então observável um elevado erro entre a posição alcançada e a posição desejada, não sendo este aceitável. Numa primeira tentativa de colmatar este erro, a partir dos 4 testes anteriores foram calculadas as médias das posições alcançadas e, daí, um coeficiente de ajuste, a aplicar ao *setpoint* de posição. Este coeficiente trata-se então de um *off-set* a dar ao *setpoint* da ação de paragem. O coeficiente de ajuste é calculado através da equação 7.4 e o *setpoint* através da equação 7.5, estando os valores obtidos na Tabela 74.

$$C_{[d,s]} = P_{[d,s]} - M_{[d,s]} \quad (7.4)$$

Onde:

$C_{[d,s]}$ é o coeficiente de ajuste, sendo d representativo da descida e s da subida;

$M_{[d,s]}$ é a média das posições obtidas, [mm];

$P_{[d,s]}$ é a posição pretendida, [mm].

$$S_{[d,s]} = P_{[d,s]} + C_{[d,s]} \quad (7.5)$$

Onde:

$S_{[d,s]}$ é o novo *setpoint*, sendo d representativo da descida e s da subida, [mm];

$P_{[d,s]}$ é a posição pretendida, [mm];

$C_{[d,s]}$ é o coeficiente de ajuste, [mm].

Tabela 74 –Média das posições alcançadas nos testes e coeficientes de erro daí retirados

Movimento	Média da Posição Alcançada [mm]	Coeficiente de Ajuste [mm]	Setpoint
Descida	245,35	Cd = -45,35	154,65
Subida	58,08	Cs = 41,92	141,92

Foram então realizados mais 3 testes utilizando estes coeficientes de erro para a descida e subida, usando os *setpoints* mostrados na tabela em vez das posições desejadas. Estes dados podem ser visualizados na Figura 109 e Tabela 75.

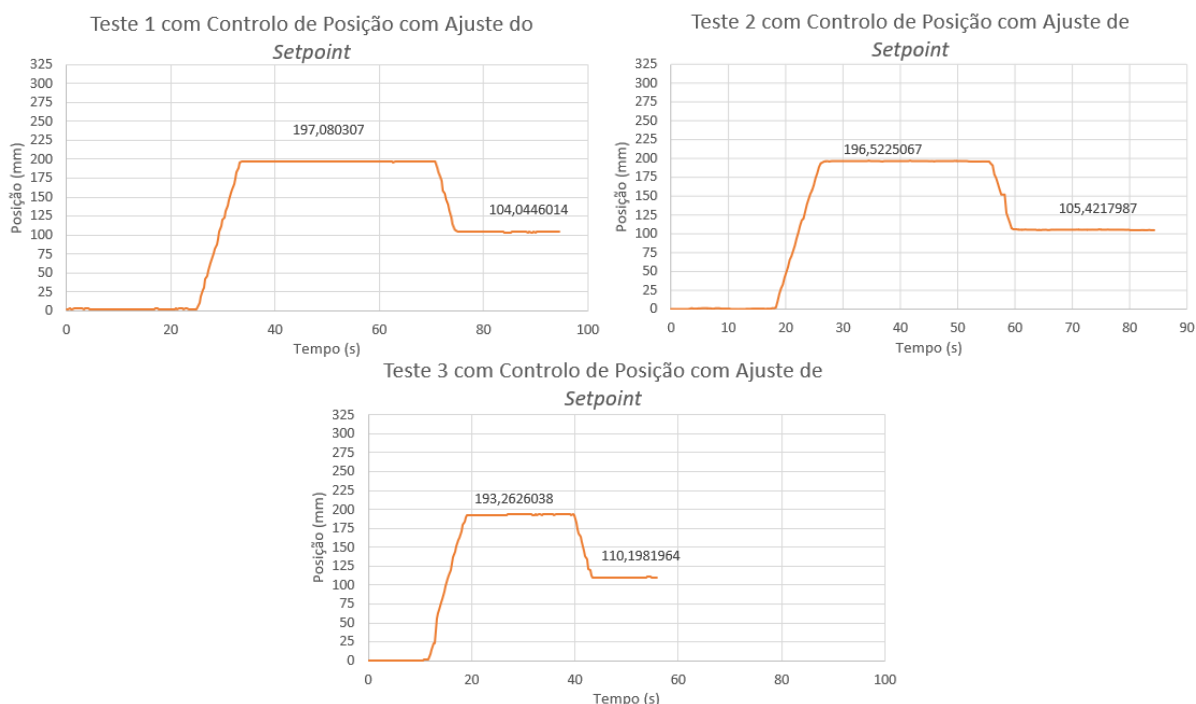


Figura 109 – Testes de controlo de posição com ajuste de *setpoint*

Tabela 75 – Posições alcançadas e erros obtidos nos testes de posição nos testes com coeficiente de erro fixo

Teste	Sentido do Movimento	Posição Alcançada [mm]	Erro Absoluto [mm]
1	Descida	197,08	2,92
	Subida	104,04	-4,04
2	Descida	196,52	3,48
	Subida	105,42	-5,45
3	Descida	193,26	6,74
	Subida	110,20	-10,2

Podemos já observar um decréscimo significativo no erro de posição obtido. Apesar disso, este erro ainda apresenta variações consideráveis, não aparentando estar a tender para o zero, o que já seria de esperar dado ao comportamento estocástico da origem destes erros.

Foi então determinado que se usaria um método iterativo para determinar os coeficientes de ajuste e, assim, o offset a dar ao movimento de descida e subida do prato. Onde antes o coeficiente era fixo e extraído dos 4 primeiros testes realizados, os novos coeficientes serão calculados após cada movimento de subida ou descida através da equação 7.6, utilizando o coeficiente desse movimento para atualizar o coeficiente do movimento seguinte.

$$C_{[d,s]n} = \frac{(E_{[d,s]n} + C_{[d,s]n-1}) + C_{[d,s]n-1}}{2} \quad (7.6)$$

Onde:

$C_{[d,s]n}$ é o novo coeficiente de erro, sendo d representativo da descida e s da subida;

$C_{[d,s]n-1}$ é o coeficiente de erro do movimento anterior;

$E_{[d,s]n}$ é o erro chegado no movimento n .

Usando este método foram realizados 5 testes com a atualização do coeficiente de erro estando os dados obtidos apresentados na Tabela 76.

Tabela 76 – Posições alcançadas e erros obtidos nos testes de posição com coeficiente de erro iterativo

Teste	Sentido do Movimento	Posição Alcançada [mm]	Erro Absoluto [mm]	Coeficiente de Ajuste Atualizado [mm]
1	Descida	192,9	7,1	-41,8
	Subida	110,8	-10,8	36,52
2	Descida	199,47	0,53	-41,53
	Subida	100,1	-0,1	36,47
3	Descida	199,92	0,08	-41,49
	Subida	99,51	0,49	36,72
4	Descida	198,85	1,15	-40,92
	Subida	99,51	0,49	36,96
5	Descida	200,1	-0,1	-40,97
	Subida	99,9	0,1	37,01

Já se pode observar uma clara diminuição no erro absoluto, mostrado claramente na Figura 110, tal como, uma estabilização na sua variação. Foi também calculado, através da média dos erros absolutos, o erro relativo à escala total de medição. Para a descida, o erro foi de 0,58% e na subida de 0,78%.

Apesar disso, e como era esperado, este erro de posição não cobre os requisitos para a realização de controlo da espessura de placas compósitas, sendo mesmo assim aceitável no aspeto de posicionamento do prato em zonas específicas, permitindo ao operador posicionar o prato na posição que lhe for mais conveniente para os testes a realizar. Na Figura 111 está representada a curva para a última iteração de validação do controlador. Uma mais valia que este sistema traz ao processamento de placas, é a monitorização da sua espessura durante a cura. Um facto também demarcado, como muito importante, pelos membros da UMEC.

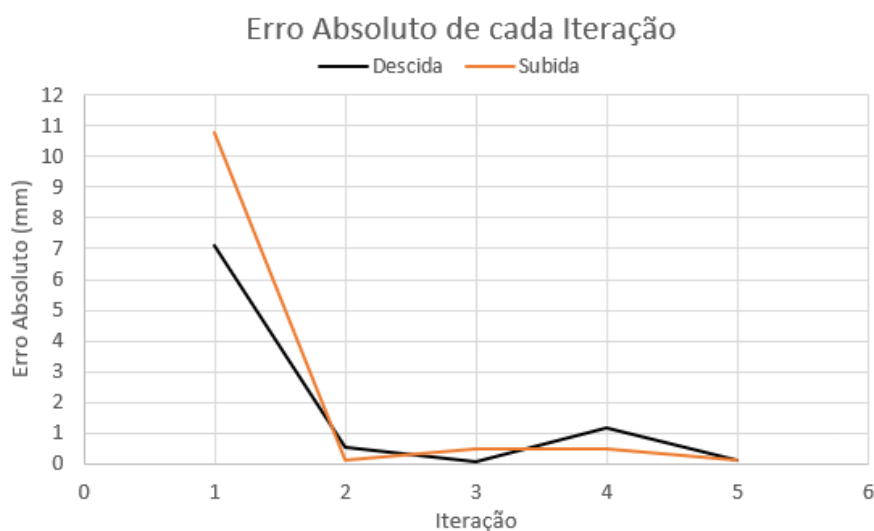


Figura 110 – Representação dos Erros Absolutos de cada Iteração

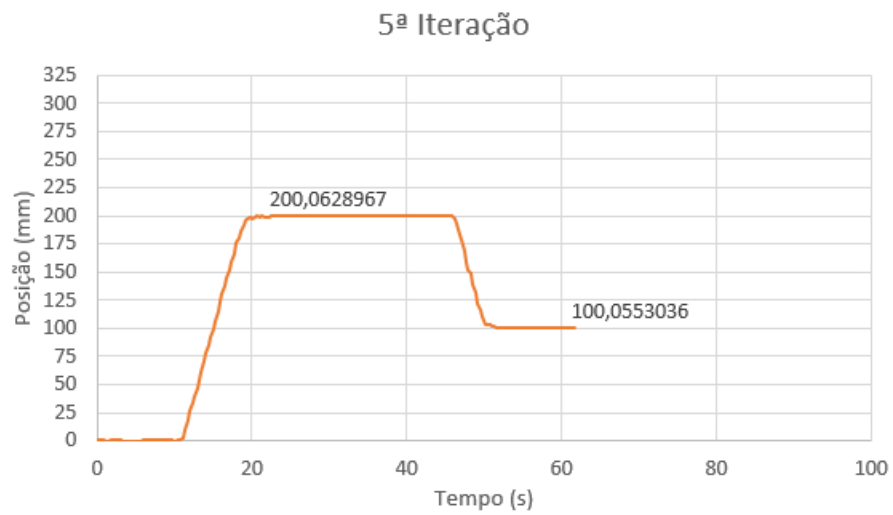


Figura 111 – Teste de controlo de posição após 5 iterações com o cálculo dos coeficientes de ajuste

8 Conclusões e Trabalhos Futuros

Durante a realização desta dissertação foi constatado que a Indústria 4.0, apesar de ainda estar nos seus inícios, tem muitos apoios, quer com incentivos nacionais, quer com incentivos realizados internacionalmente, pela União Europeia ou outros conglomerados de países, tal como existir um movimento geral pelos grandes membros da indústria na direção de adotar os conceitos da Indústria 4.0. Esta, apresenta como principais conceitos a conectividade e autonomia tecnológica das máquinas, sistema de máquinas e até de fábricas inteiras de modo a otimizar todos os níveis da cadeia de produção, desde a conceção e design de um produto até à sua logística de distribuição e venda. A Indústria 4.0 reúne conceitos multidisciplinares, sendo necessária uma grande variedade de conhecimentos e perícias para a sua correta implementação. Sendo este aspeto uma das maiores dificuldades no avanço da Indústria 4.0 por entre as pequenas e médias empresas, sendo que o investimento necessário, em conjunto com um desconhecimento generalizado de todas implicações e benefícios trazidos, é muitas vezes impeditivo à completa aplicação destes conceitos.

O processo de *retrofit* mostra-se, então, como uma boa solução para colmatar este problema, visto que o principal objetivo passa por retirar o máximo aproveitamento de equipamentos, perto da obsolescência, ao mesmo tempo que lhes são adicionadas funcionalidades ou tecnologias modernas.

Quanto à prensa hidráulica em estudo, foi concluído que esta não possuía de forma alguma as capacidades de controlo ou comunicação necessárias à sua integração nos conceitos da Indústria 4.0, não apresentando flexibilidade no controlo, nem monitorização adequada dos elementos envolvidos, que possibilitasse uma supervisão remota (e digital) fiável do seu estado de operação. Foi também concluído que, apesar de existirem no mercado prensas dedicadas a trabalho laboratorial com capacidades de controlo fino, estas não apresentavam um design especificamente centrado nos conceitos da Indústria 4.0, nem continham software de controlo facilmente acessível (em termos de edição) ao utilizador. Estas características estão presentes, de modo mais forte, em equipamentos industriais de grande escala, inadequados para a aplicação desejada.

Assim, utilizando equipamentos de fabricantes variados com um mínimo de *software* proprietário, foi possível definir e projetar uma solução que permitirá a integração da prensa existente numa rede de comunicação de máquinas. Embora esta rede ainda não se encontre integrada, foi, no entanto, realizado um teste de comunicação, através da rede principal de trabalho do edifício, utilizando o PLC programado e um computador remoto, tendo este ocorrido com sucesso e sem dificuldades de instalação. Deste modo, mostrou-se que a solução escolhida para o efeito, por meio de uma arquitetura de comunicação OPC-UA, se apresenta como satisfazendo plenamente as necessidades do INEGI e da UMEC.

Quanto ao controlo da prensa, um controlador de força foi estimado com sucesso, apresentando este mais flexibilidade e precisão que o controlador original, com erros absolutos médios na resposta ao degrau na ordem dos 200N. Este sistema também conseguiu seguir de forma aceitável uma solicitação em rampa, sendo que o equipamento original não continha de todo esta capacidade. Na resposta a solicitações em rampa com um declive de 1000 N/s observaram-se erros absolutos médios na ordem dos 600N, sendo estes aceitáveis para a execução dos projetos da UMEC.

Quanto ao controlado de temperatura, este não apresentou um comportamento satisfatório, não conseguindo estabilizar a temperatura dos pratos, sendo necessário um melhor estudo, quer da dinâmica de aquecimento dos pratos e do sistema de distribuição de fluído, quer da dinâmica do controlador MP-888 integrado no termorregulador. Ainda assim, o sistema revelou ser capaz de seguir uma solicitação em rampa com um declive até 4°C/min de forma relativamente estável, algo que o sistema original era também incapaz de fazer.

O controlo de posição, devido à construção da central hidráulica, que utilizando uma válvula proporcional e uma válvula direcional, mostrou-se incapaz de ser usado para controlar a espessura do material a ser consolidado, sendo que foi possível, mesmo assim, chegar a um controlo de posição aceitável, capaz de auxiliar o operador, quando necessário colocar o prato numa posição específica de forma a facilitar o posicionamento das placas, de acordo com os pedidos dos elementos da UMEC.

Infelizmente, devido ao elevado uso da prensa pela unidade, não foi possível realizar a instalação definitiva dos sistemas projetados, sendo que esta instalação terá de ser realizada futuramente.

De notar, que existem diversas alterações, além das descritas nesta dissertação, que poderão ser efetuadas para melhorar o funcionamento da prensa.

Em primeiro lugar, mesmo com os sistemas projetados, a prensa não apresenta maneira de uniformizar a temperatura por toda a área do prato. Para alcançar esse efeito, sugere-se a instalação de um novo prato, com canais de distribuição de fluído térmico dimensionados para que a distribuição deste, e assim da energia térmica, ocorra de tal maneira a criar um campo uniforme de temperatura. Além disso, estando o campo de temperaturas uniformizado, as resistências de aquecimento que não foram retiradas da prensa podem ser usadas para permitir campos de temperatura personalizáveis.

Outra ação proposta, que poderá melhorar o controlo de posição do prato inferior, é a substituição da válvula direcional da central hidráulica por uma válvula proporcional direcional, capaz assim de um controlo mais fino da posição.

Ainda na central hidráulica, durante a análise desta, foi evidenciado que a prevenção da ocorrência de cavitação durante a descida do êmbolo, só é realizada pelo facto de a válvula direcional estar posicionada a uma cota maior que a saída de óleo da câmara inferior. Apesar de não terem sido detetados problemas causados por este facto, é aconselhado a instalação de uma válvula de contrapressão, para assim assegurar a não ocorrência de cavitação. O controlo de força, quando solicitado em rampa, apresentou fenómenos de *slip-stick*, sendo aconselhado a substituição dos vedantes utilizados no cilindro por vedantes de baixo atrito, de forma prevenir este comportamento.

Para além disto, no decorrer dos testes dos controladores de processo foi detetada a necessidade de manutenção quer da central hidráulica, quer do sistema de distribuição de fluído térmico, sendo aconselhado que esta se realize.

Referências

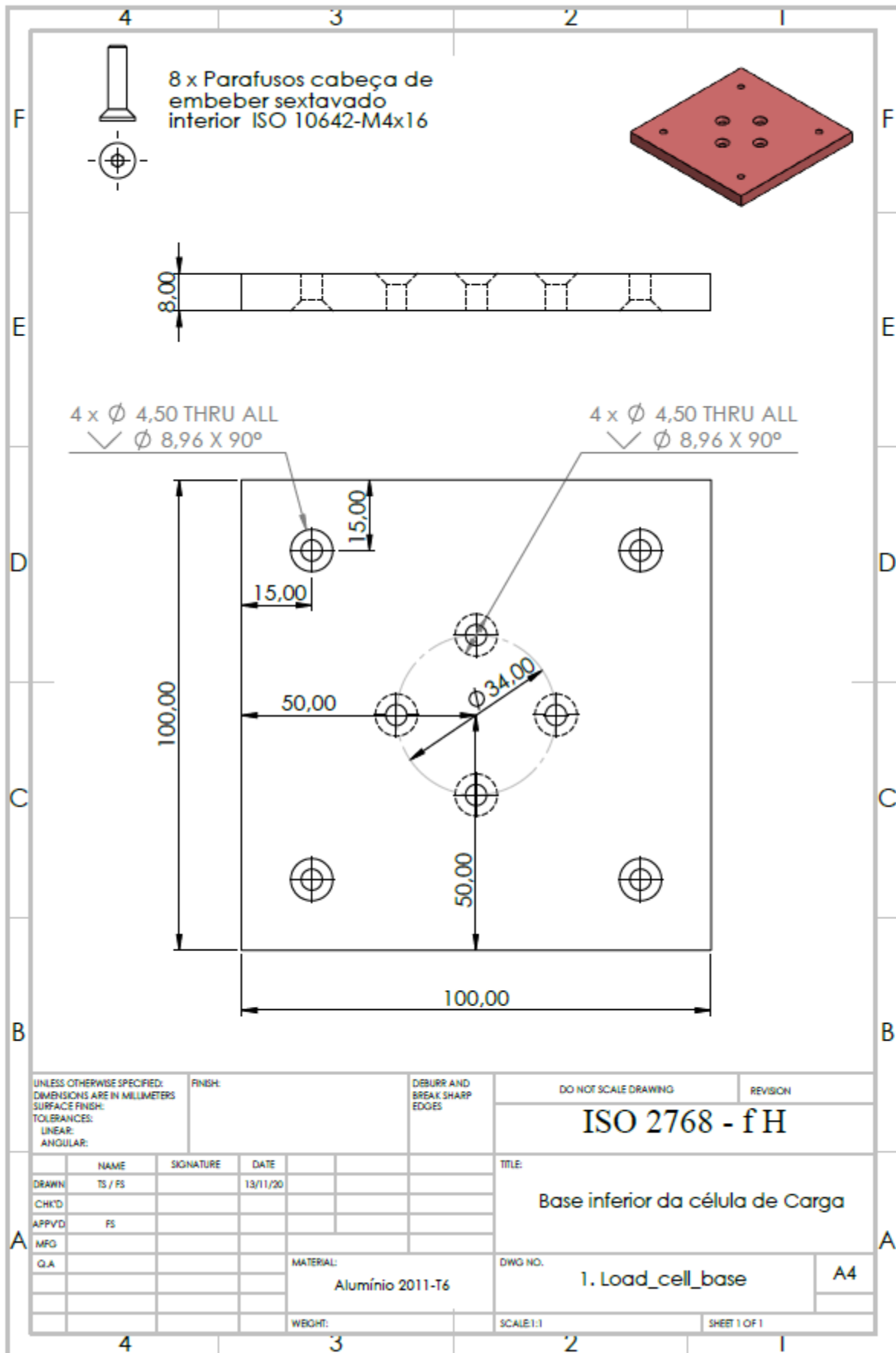
- Al-Maeeni, Sara Salman Hassan, Christopher Kuhnhen, Bernd Engel, e Michael Schiller. (2020). "Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0." *Procedia CIRP* 88:369-374. [doi: 10.1016/j.procir.2020.05.064](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.064)
- Alcacer, V., e V. Cruz-Machado. (2019). "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems." *Engineering Science and Technology-an International Journal-Jestech* 22 (3):899-919. [doi: 10.1016/j.jestech.2019.01.006](https://doi.org/10.1016/j.jestech.2019.01.006)
- Atzori, Luigi, Antonio Iera, e Giacomo Morabito. (2010). "The Internet of Things: A survey." *Computer Networks* 54 (15):2787-2805. [doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010)
- Bojana Nikolic, Jelena Ignjatic, Nikola Suzic, Branislav Stevanov, e Aleksandar Rikalovic. (2017) "Predictive Manufacturing Systems in Industry 4.0: Trends, Benefits and Challenges." In: *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, Vienna, Austria. [doi:10.2507/28th.daaam.proceedings.112](https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.112).
- Carver, Inc. (2020). "Carver Bench Top Standard Auto Series Plus Model Presses: 15, 25, 30 and 48 Ton Capacity." acedido 22/12/20. <https://carverpress.com/products/benchtopy-auto/standard>.
- Cséfalvay, Zoltán. (2019). "Robotization in Central and Eastern Europe: catching up or dependence?" *European Planning Studies* 28 (8):1534-1553. [doi: 10.1080/09654313.2019.1694647](https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1694647)
- Dalenogare, Lucas Santos, Guilherme Brittes Benitez, Néstor Fabián Ayala, e Alejandro Germán Frank. (2018). "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance." *International Journal of Production Economics* 204:383-394. [doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019)
- Davis, Ron. (2015) Industry 4.0: Digitalisation for productivity and growth. European Parliamentary Research Service. Report Number: [568.337](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019)
- Drahos, Peter, Erik Kucera, Oto Haffner, e Ivan Klimo. (2018) "Trends in industrial communication and OPC UA." In: *2018 Cybernetics & Informatics (K&I)*. [doi:10.1109/cyberi.2018.8337560](https://doi.org/10.1109/cyberi.2018.8337560)
- Ehrlich, Marco, Lukasz Wisniewski, e Jürgen Jasperneite. (2015) "Usage of Retrofitting for Migration of Industrial Production Lines to Industry 4.0." In: *Komma 2015 - Colóquio Anual de Comunicação em Automação*, Magdeburg, Germany. ISBN: 978-3944722337
- Ferreira, Luis Lino, Michele Albano, Jose Silva, Diogo Martinho, Goreti Marreiros, Giovanni di Orio, Pedro Malo, e Hugo Ferreira. (2017) "A pilot for proactive maintenance in industry 4.0." In: *2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, Trondheim, Norway. [doi:10.1109/wfcs.2017.7991952](https://doi.org/10.1109/wfcs.2017.7991952)

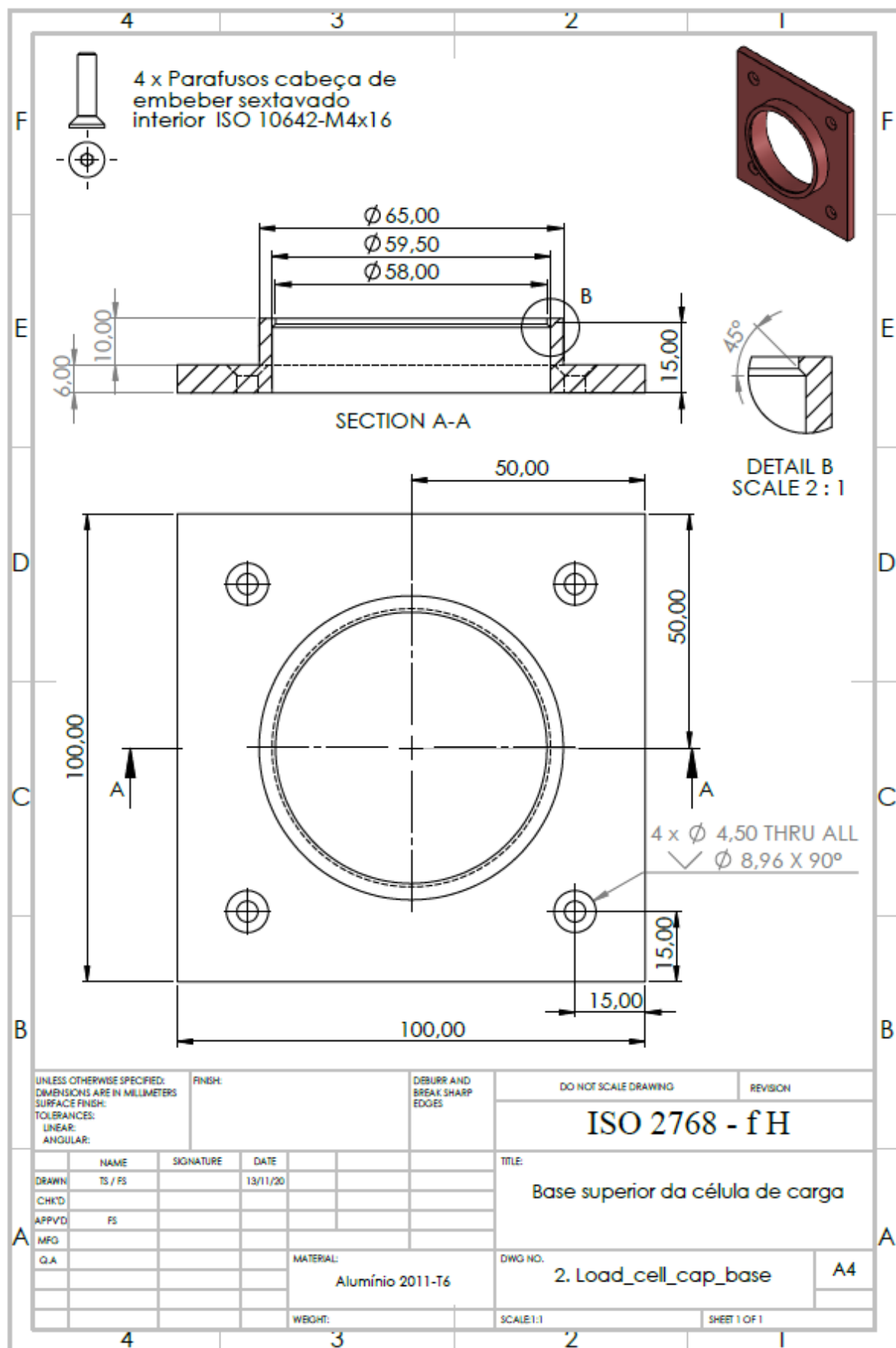
- Fonseca, Luís Miguel. (2018) "Industry 4.0 and the digital society: concepts, dimensions and envisioned benefits." In: *12th International Conference on Business Excellence*, Porto, Portugal. [doi:10.2478/picbe-2018-0034](https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0034).
- Foraboschi, Paolo. (2016). "Versatility of steel in correcting construction deficiencies and in seismic retrofitting of RC buildings." *Journal of Building Engineering* 8:107-122. [doi: 10.1016/j.jobbe.2016.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.10.003)
- Fraga-Lamas, Paula, Tiago M. Fernandez-Carames, Oscar Blanco-Novoa, e Miguel A. Vilar-Montesinos. (2018). "A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard." *IEEE Access* 6:13358-13375. [doi: 10.1109/ACCESS.2018.2808326](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326)
- Fuengwarodsakul, Nisai H. (2009) "Retrofitting a used car with hybrid electric propulsion system." In: *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. [doi:10.1109/ecticon.2009.5136977](https://doi.org/10.1109/ecticon.2009.5136977)
- Gao, Wei, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C. L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, e Pablo D. Zavattieri. (2015). "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering." *Computer-Aided Design* 69:65-89. [doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001)
- Garcia-Garza, M. A., H. Ahuett-Garza, M. G. Lopez, P. Orta-Castanon, T. R. Kurfess, P. D. Urbina Coronado, D. Guemes-Castorena, S. G. Villa, e S. Salinas. (2019). "A Case about the Upgrade of Manufacturing Equipment for Insertion into an Industry 4.0 Environment." *Sensors (Basel)* 19 (15). [doi: 10.3390/s19153304](https://doi.org/10.3390/s19153304)
- gibitre, Instruments. (2020). "Laboratory Press." acedido a 22/12/20. https://www.gibitre.it/page_sin.php?ProdottoN=Pressa&from=menu.
- Graetz, Georg, e Guy Michaels. (2018). "Robots at Work." *The Review of Economics and Statistics* 100 (5):753-768. [doi: 10.1162/rest_a_00754](https://doi.org/10.1162/rest_a_00754)
- Hermann, Mario, Tobias Pentek, e Boris Otto. (2016) "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios." In: *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. [doi:10.1109/hicss.2016.488](https://doi.org/10.1109/hicss.2016.488)
- Hofmann, E., e M. Rüsch. (2017). "Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics." *Computers in Industry* (89):23-34. doi: 10.1016/j.compind.2017.04.002
- Ing, Tay Shu, T. C. Lee, S. W. Chan, J. Alipal, e N. Abdul Hamid. (2019). "An Overview of the Rising Challenges in Implementing Industry 4.0." *International Journal of Supply Chain Management* 8 (6):1181-1188. ISSN: [2050-7399](https://doi.org/10.24018/ijscm.2019.8.6.1181-1188)
- Jula, Amin, Elankovan Sundararajan, e Zalinda Othman. (2014). "Cloud computing service composition: A systematic literature review." *Expert Systems with Applications* 41 (8):3809-3824. [doi: 10.1016/j.eswa.2013.12.017](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.12.017)
- Kerin, M., e D. T. Pham. (2019). "A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing." *Journal of Cleaner Production* 237. [doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117805](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117805)
- Koren, Yoram, Xi Gu, e Weihong Guo. (2017). "Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends." *Frontiers of Mechanical Engineering* 13 (2):121-136. [doi: 10.1007/s11465-018-0483-0](https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0)
- Lee, Jay, Behrad Bagheri, e Hung-An Kao. (2015). "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems." *Manufacturing Letters* 3:18-23. [doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001).

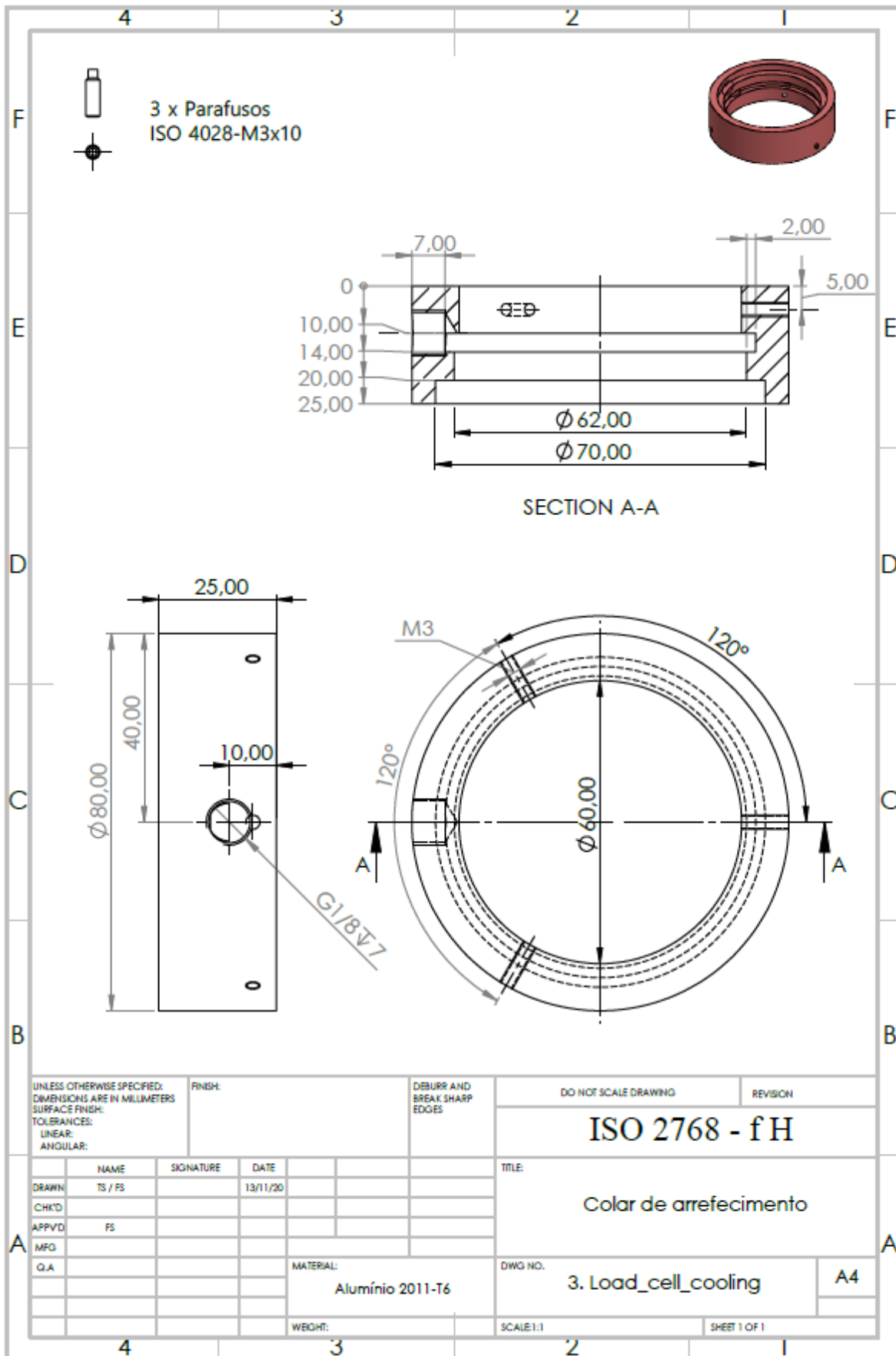
- Lele, Ajey. (2019). "Industry 4.0." In *Disruptive Technologies for the Militaries and Security*, 205-215. Springer.
- Lezzi, Marianna, Mariangela Lazoi, e Angelo Corallo. (2018). "Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework." *Computers in Industry* 103:97-110. doi: [10.1016/j.compind.2018.09.004](https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.09.004)
- Li, Shancang, Li Da Xu, e Shanshan Zhao. (2014). "The internet of things: a survey." *Information Systems Frontiers* 17 (2):243-259. doi: [10.1007/s10796-014-9492-7](https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7)
- Lins, Theo, Ricardo Augusto Rabelo Oliveira, Luiz H. A. Correia, e Jorge Sa Silva. (2018) "Industry 4.0 Retrofitting." In: *2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*. doi:[10.1109/sbesc.2018.00011](https://doi.org/10.1109/sbesc.2018.00011)
- Lins, Theo, e Ricardo Augusto Rabelo Oliveira. (2020). "Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0." *Computers & Industrial Engineering* 139:106193. doi: [10.1016/j.cie.2019.106193](https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193)
- Masood, Tariq, e Johannes Egger. (2019). "Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 58:181-195. doi: [10.1016/j.rcim.2019.02.003](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.003)
- Melanson, Tony. (2018). "What Industry 4.0 Means for Manufacturers." acessado a 18/12/20. <https://aethon.com/mobile-robots-and-industry4-0/>.
- Mourtzis, Dimitris, John Angelopoulos, e Nikolaos Panopoulos. (2020). "Recycling and retrofitting for industrial equipment based on augmented reality." *Procedia CIRP* 90:606-610. doi: [10.1016/j.procir.2020.02.134](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.134)
- Muhlbauer, Nikolas, Erkin Kirdan, Marc-Oliver Pahl, e Georg Carle. (2020) "Open-Source OPC UA Security and Scalability." In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. doi:[10.1109/etfa46521.2020.9212091](https://doi.org/10.1109/etfa46521.2020.9212091)
- Niemeyer, C. Leona, Inga Gehrke, Kai Müller, Dennis Küsters, e Thomas Gries. (2020). "Getting Small Medium Enterprises started on Industry 4.0 using retrofitting solutions." *Procedia Manufacturing* 45:208-214. doi: [10.1016/j.promfg.2020.04.096](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.096)
- Oliver, Alexandra Jane. (2015). "ECO Retrofit service – making bulbous bow optimizations future-proof." DNV GL, acessado a 16/10/20. <https://www.dnvgl.com/news/eco-retrofit-service-making-bulbous-bow-optimizations-future-proof-33440>.
- Orzes, G., E. Rauch, S. Bednar, e R. Poklemba. (2018) "Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study." In: *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. doi:[10.1109/ieem.2018.8607477](https://doi.org/10.1109/ieem.2018.8607477)
- Oussous, Ahmed, Fatima-Zahra Benjelloun, Ayoub Ait Lahcen, e Samir Belfkih. (2018). "Big Data technologies: A survey." *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 30 (4):431-448. doi: [10.1016/j.jksuci.2017.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.06.001)
- Oztemel, Ercan, e Samet Gursev. (2018). "Literature review of Industry 4.0 and related technologies." *Journal of Intelligent Manufacturing* 31 (1):127-182. doi: [10.1007/s10845-018-1433-8](https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8)
- Pérez-Lara, Magdiel, Jania Astrid Saucedo-Martínez, José Antonio Marmolejo-Saucedo, Tomás Eloy Salais-Fierro, e Pandian Vasant. (2018). "Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0." *Wireless Networks* 26 (7):4767-4775. doi: [10.1007/s11276-018-1873-2](https://doi.org/10.1007/s11276-018-1873-2)

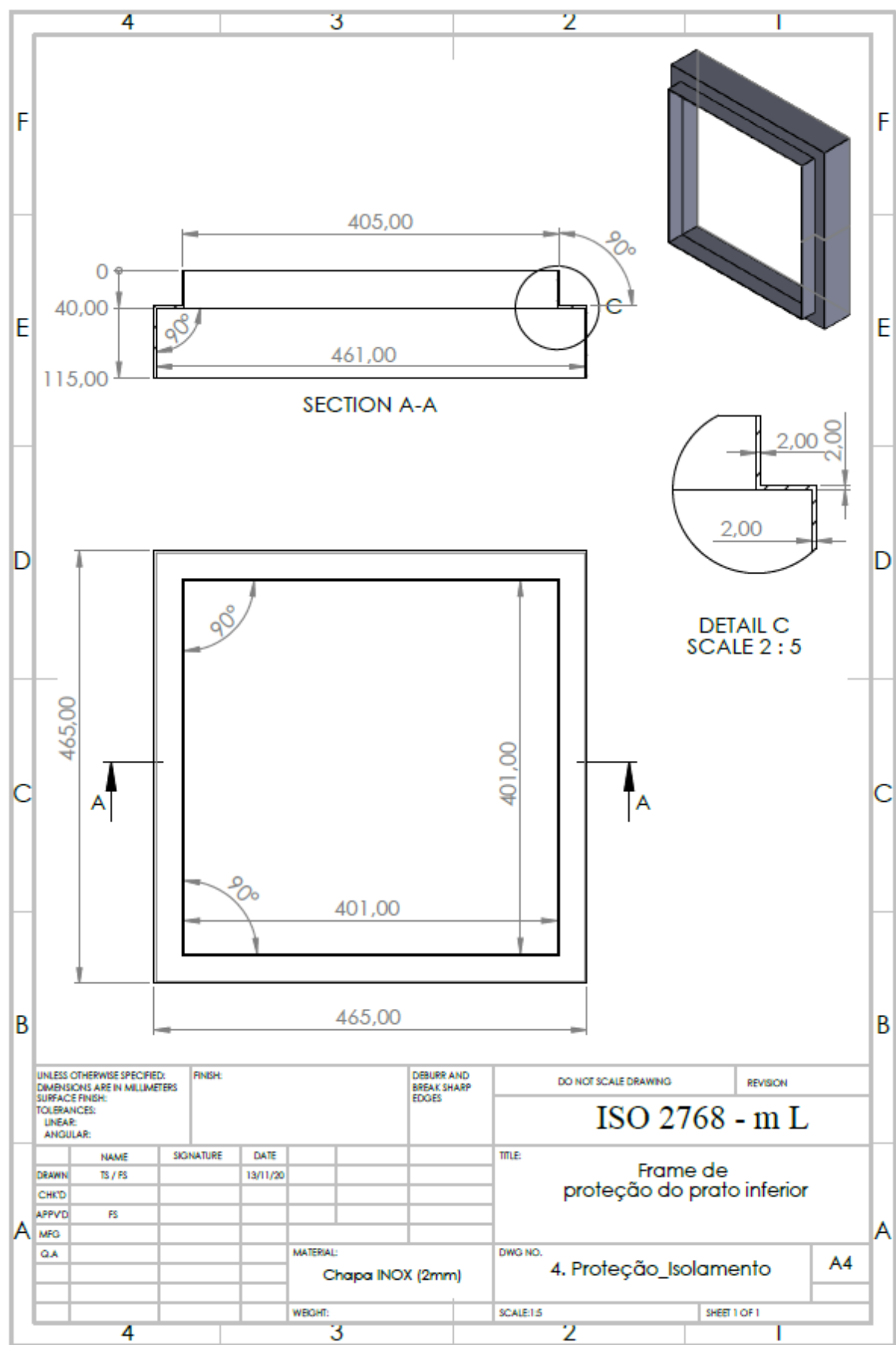
- Rodič, Blaž. (2017). "Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm." *Organizacija* 50 (3):193-207. [doi: 10.1515/orga-2017-0017](https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017)
- Sagiroglu, Seref, e Duygu Sinanc. (2013) "Big data: A review." In: *2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*. [doi:10.1109/CTS.2013.6567202](https://doi.org/10.1109/CTS.2013.6567202)
- Santos, B. P., A. Alberto, T.D.F.M. Lima, e F.M.B. Charrua-Santos. (2018). "Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades." *Revista Produção e Desenvolvimento* 4 (1):111-124. ISSN: [2446-9580](https://doi.org/10.1515/rpd-2018-0010)
- Schröder, Christian. (2016). "The Challenges of Industry 4.0 for Small and Medium-sized Enterprises." *Friedrich-Ebert-Stiftung*,. ISSN: [978-3-95861-543-4](https://doi.org/10.1007/978-3-95861-543-4)
- Shibaura, Machine. (2020). "Shibaura Machine's IoT+m." <https://www.shibaura-machine.co.jp/en/>.
- SIEMENS, AG. (2019). *SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID Control Function Manual*. acessado a 27/02/21 <https://support.industry.siemens.com/cs/document/108210036/simatic-s7-1200-s7-1500-pid-control?dti=0&lc=en-WW>
- Takakuwa, Soemon, Ivica Veza, e Stipe Celar. (2018) "Industry 4.0 in Europe and East Asia." In: *29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, Vienna, Austria. [doi:10.2507/29th.daaam.proceedings.009](https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.009).
- Wegner, Andre, James Graham, e Eli Ribble. (2017). *Cybersecurity for Industry 4.0*, Springer Series in Advanced Manufacturing.
- WICKERT. (2020). "Industry 4.0." acessado a 22/12/20. <https://www.wickert-presstech.de/en/service/industry-4-0/>.
- Xu, Li Da, Eric L. Xu, e Ling Li. (2018). "Industry 4.0: state of the art and future trends." *International Journal of Production Research* 56 (8):2941-2962. [doi: 10.1080/00207543.2018.1444806](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806)
- Yanagida, Tetsuo. (2018). "Challenge for Hull-Form Optimization Tailored to Actual Operation Environments." acessado a 22/12/20 <https://www.monohakobi.com/en/news/mtijournal/yanagida/>.
- Zambetti, Michela, Muztoba A. Khan, Roberto Pinto, e Thorsten Wuest. (2020). "Enabling servitization by retrofitting legacy equipment for Industry 4.0 applications: benefits and barriers for OEMs." *Procedia Manufacturing* 48:1047-1053. [doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.144](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.144)
- Zhou, Zhihua, Shuzhen Zhang, Chendong Wang, Jian Zuo, Qing He, e Raufdeen Rameezdeen. (2016). "Achieving energy efficient buildings via retrofitting of existing buildings: a case study." *Journal of Cleaner Production* 112:3605-3615. [doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.046](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.046)
- Zohrevand, Pedram. (2020). "Pedram Zohrevand Discusses Seismic Retrofitting of a Concrete Building." acessado a 22/12/20. <https://medium.com/@pedramzohrevand/pedram-zohrevand-discusses-seismic-retrofitting-of-a-concrete-building-ada19c633e62>.
- Zuniga, Enrique Ruiz, Matias Urenda Moris, e Anna Syberfeldt. (2017) "Integrating simulation-based optimization, lean, and the concepts of industry 4.0." In: *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. [doi:10.1109/wsc.2017.8248094](https://doi.org/10.1109/wsc.2017.8248094)

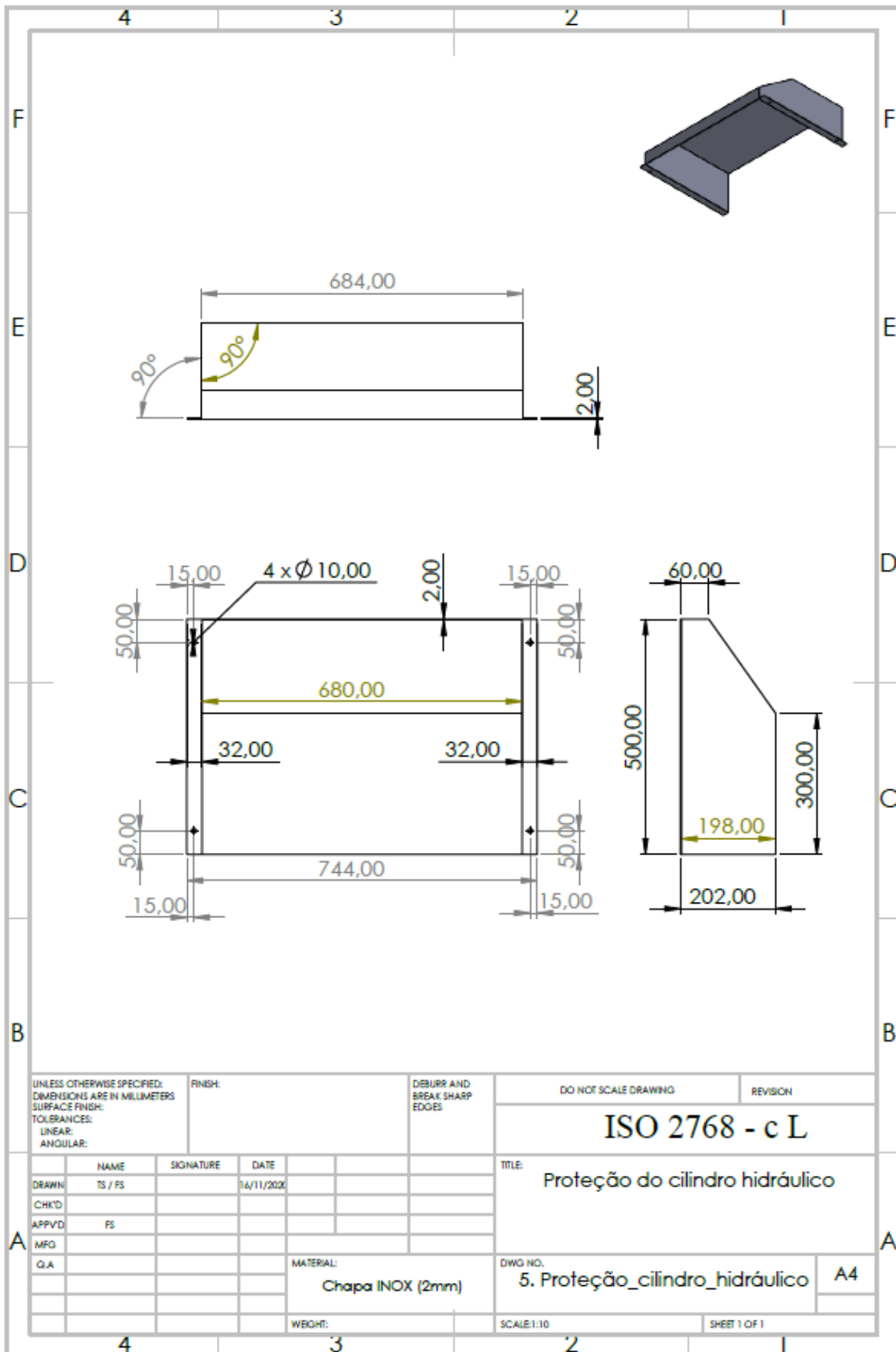
ANEXO A: Desenhos Técnicos dos Suportes das Células de Carga



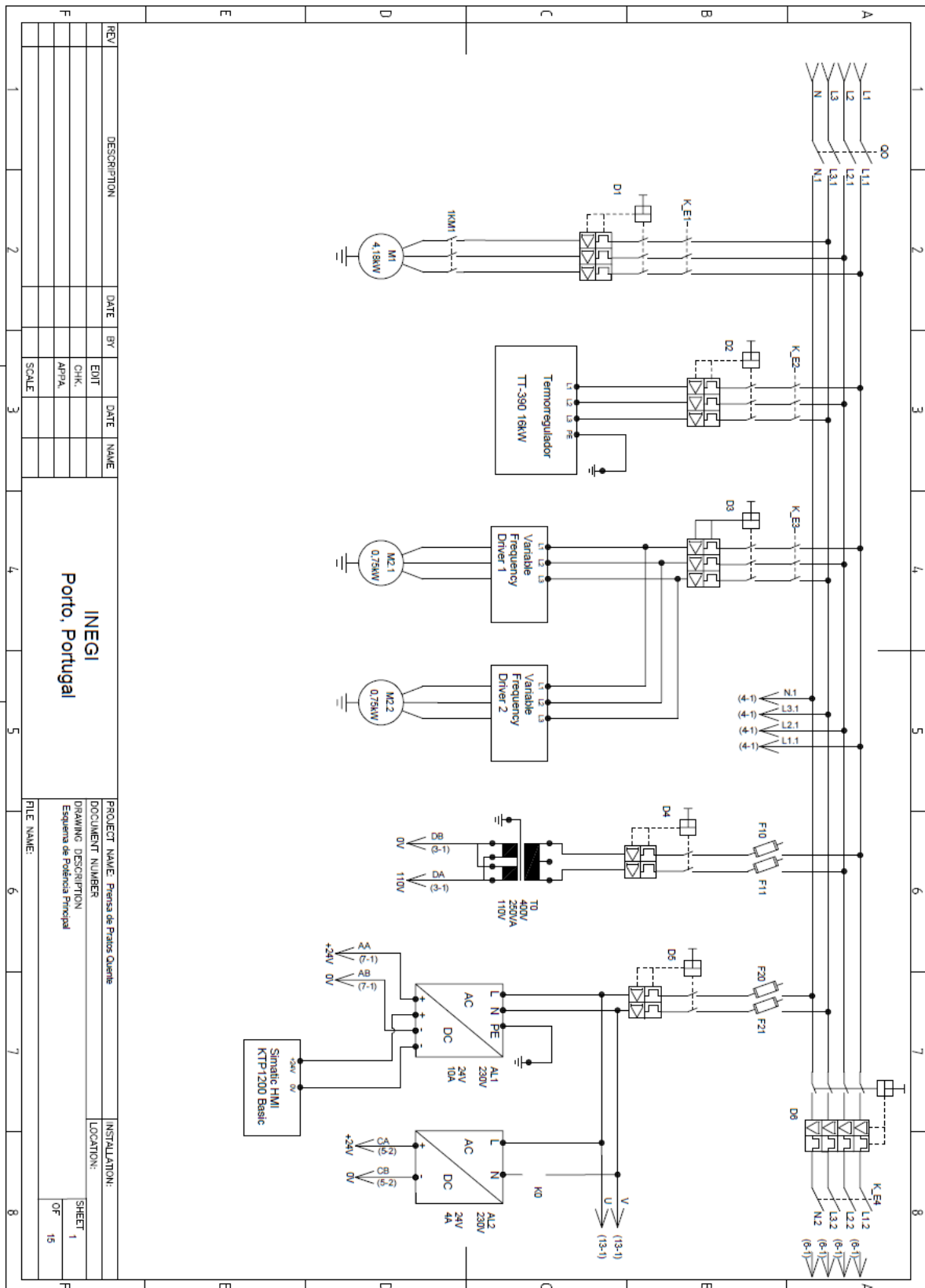


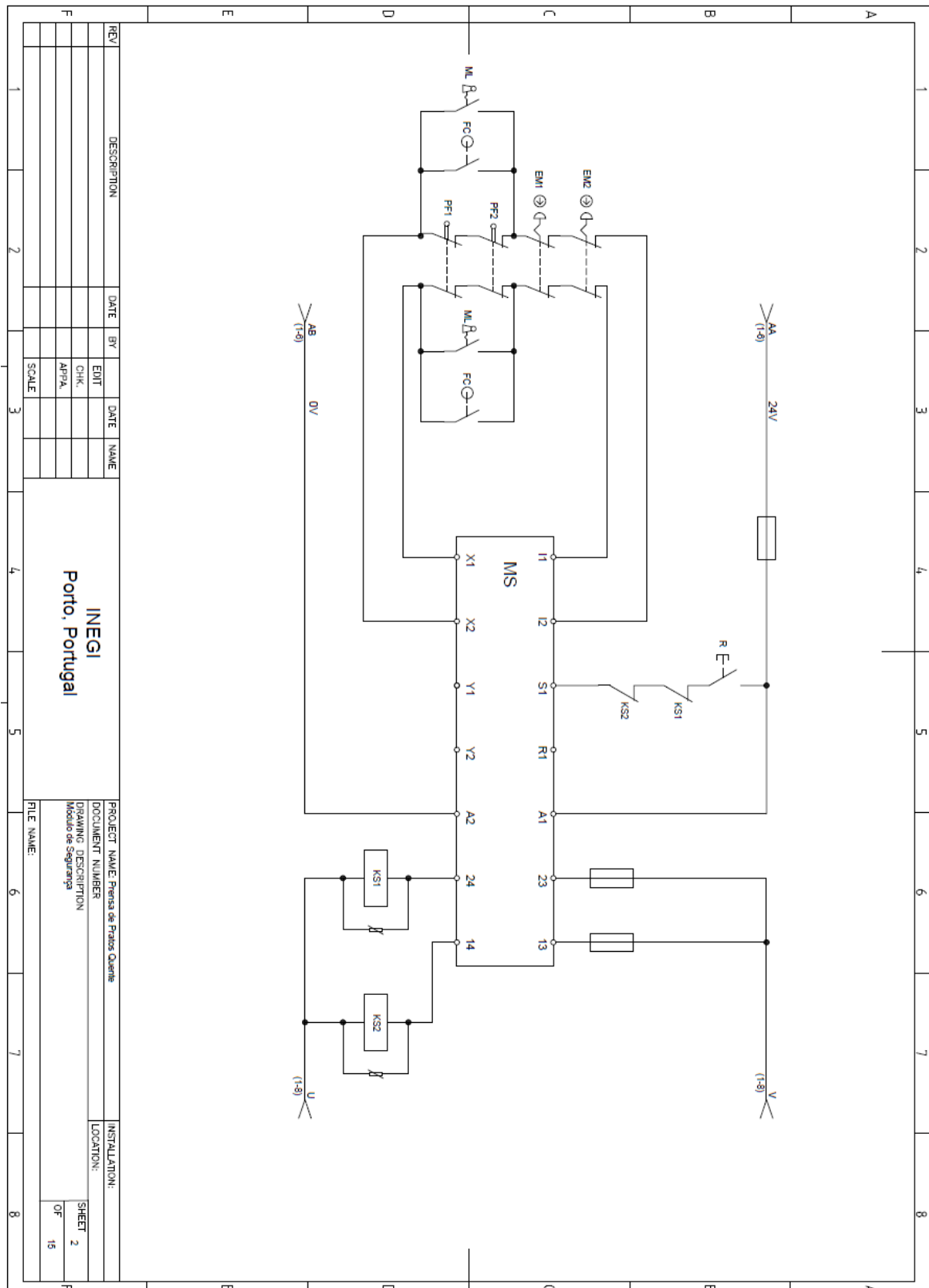


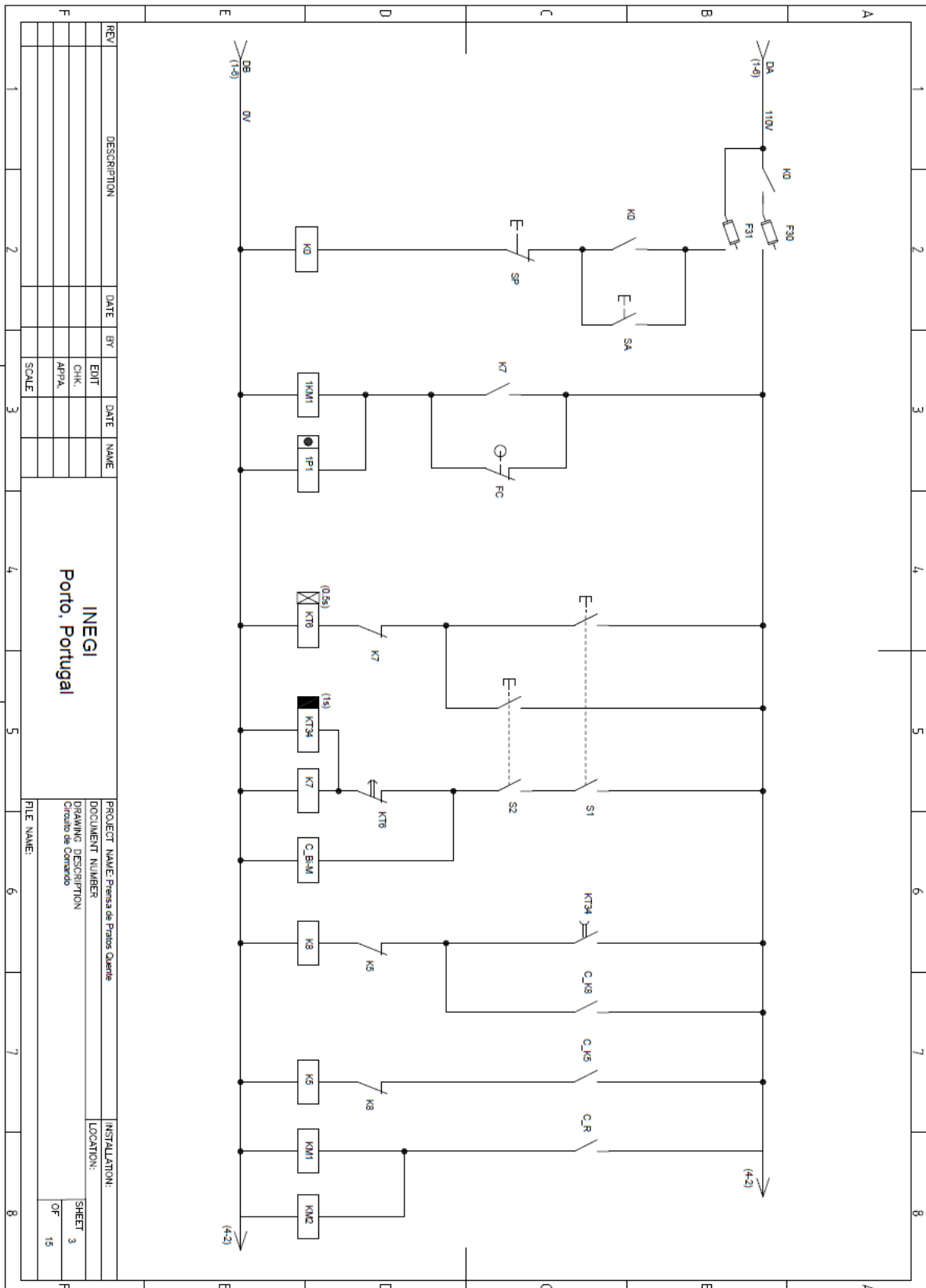


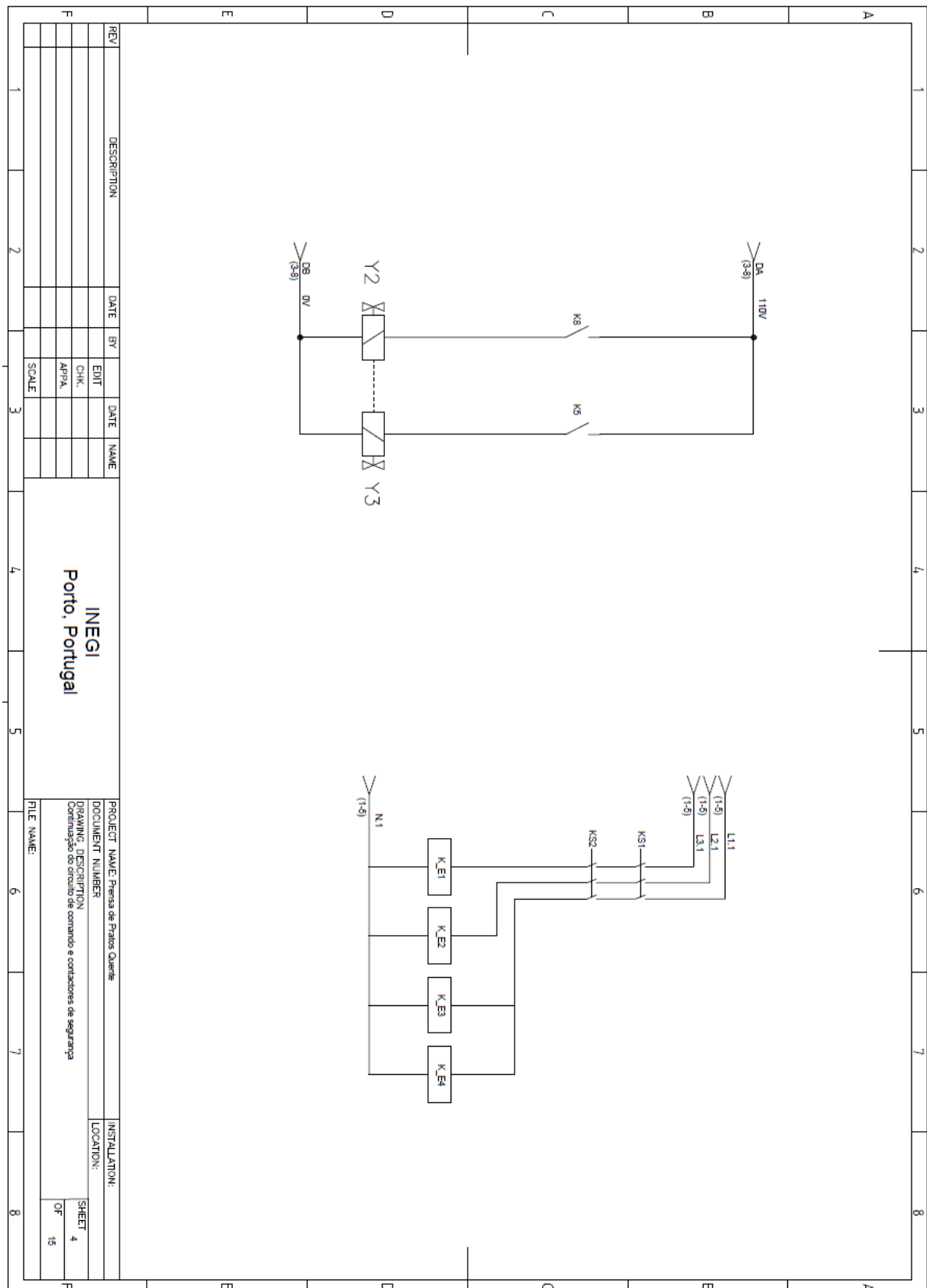


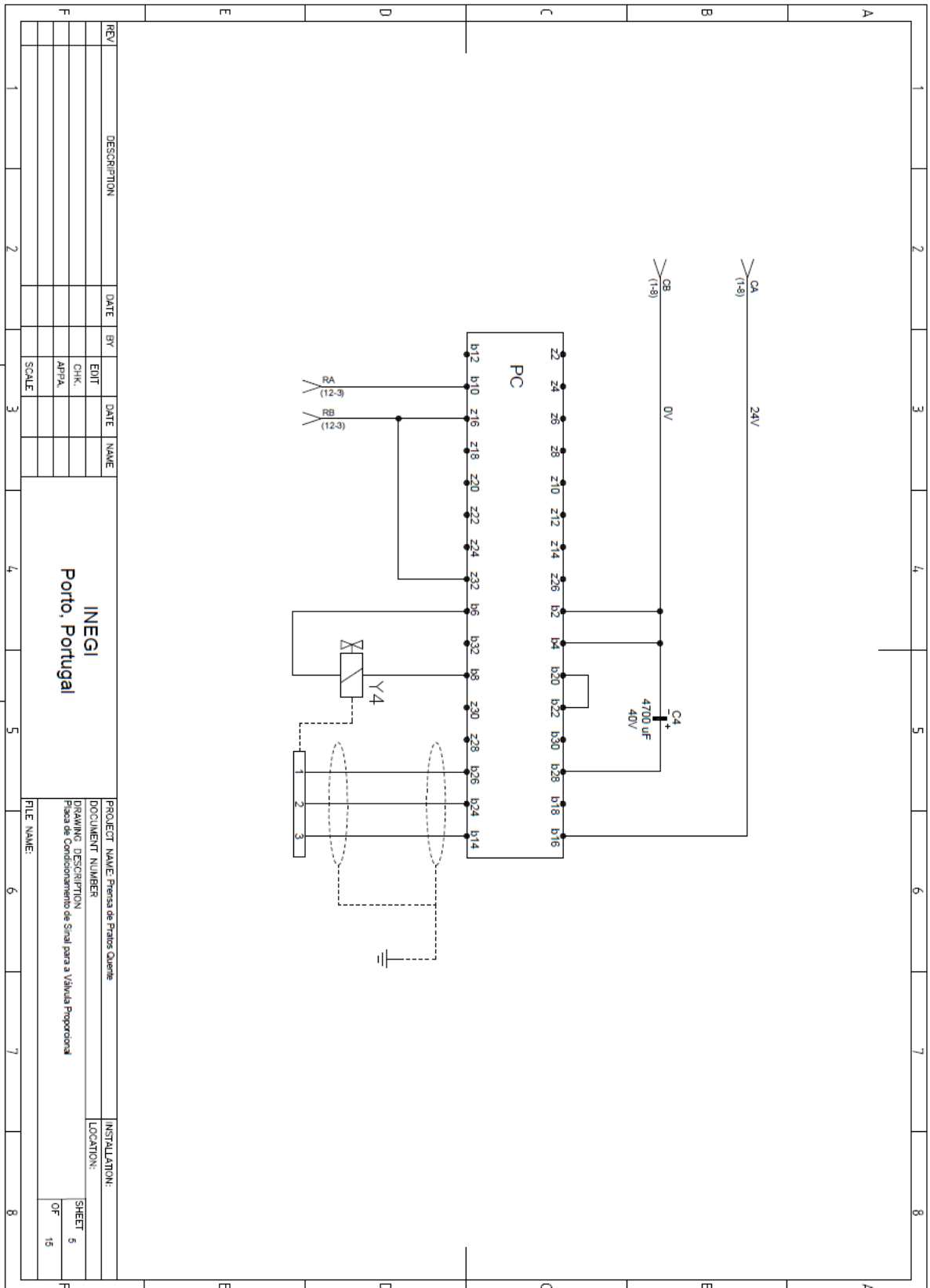
ANEXO B: Esquemas Elétricos

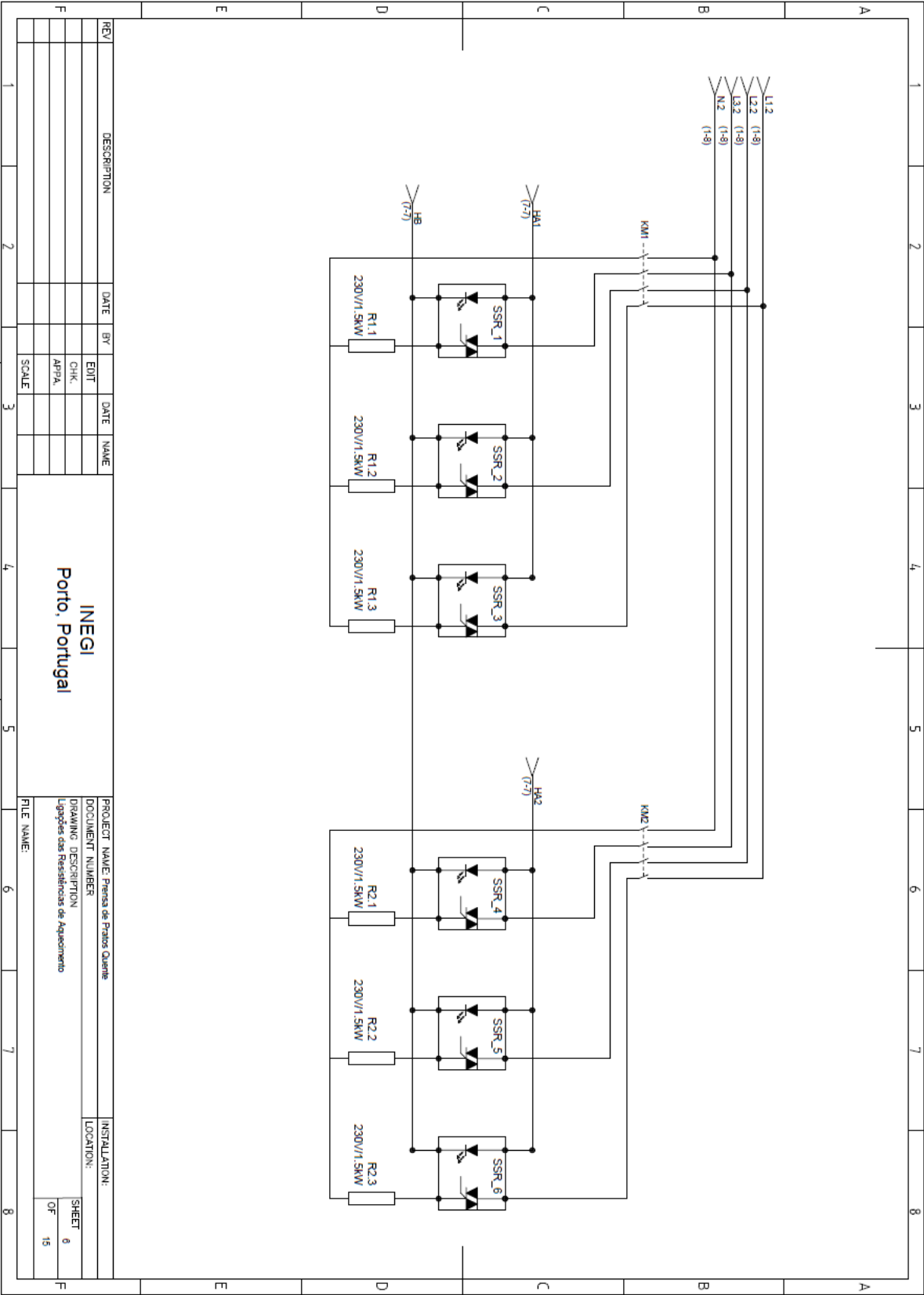


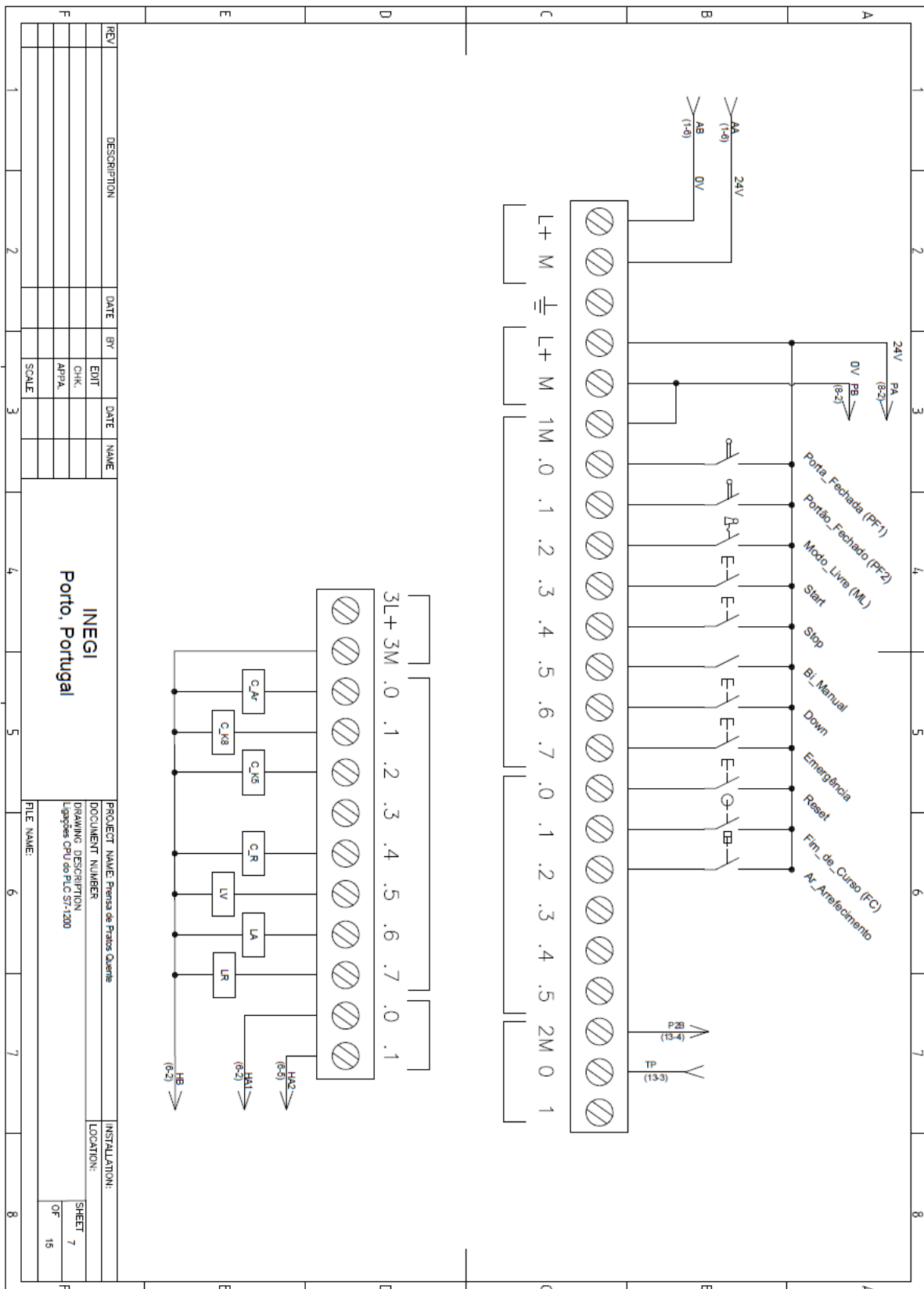


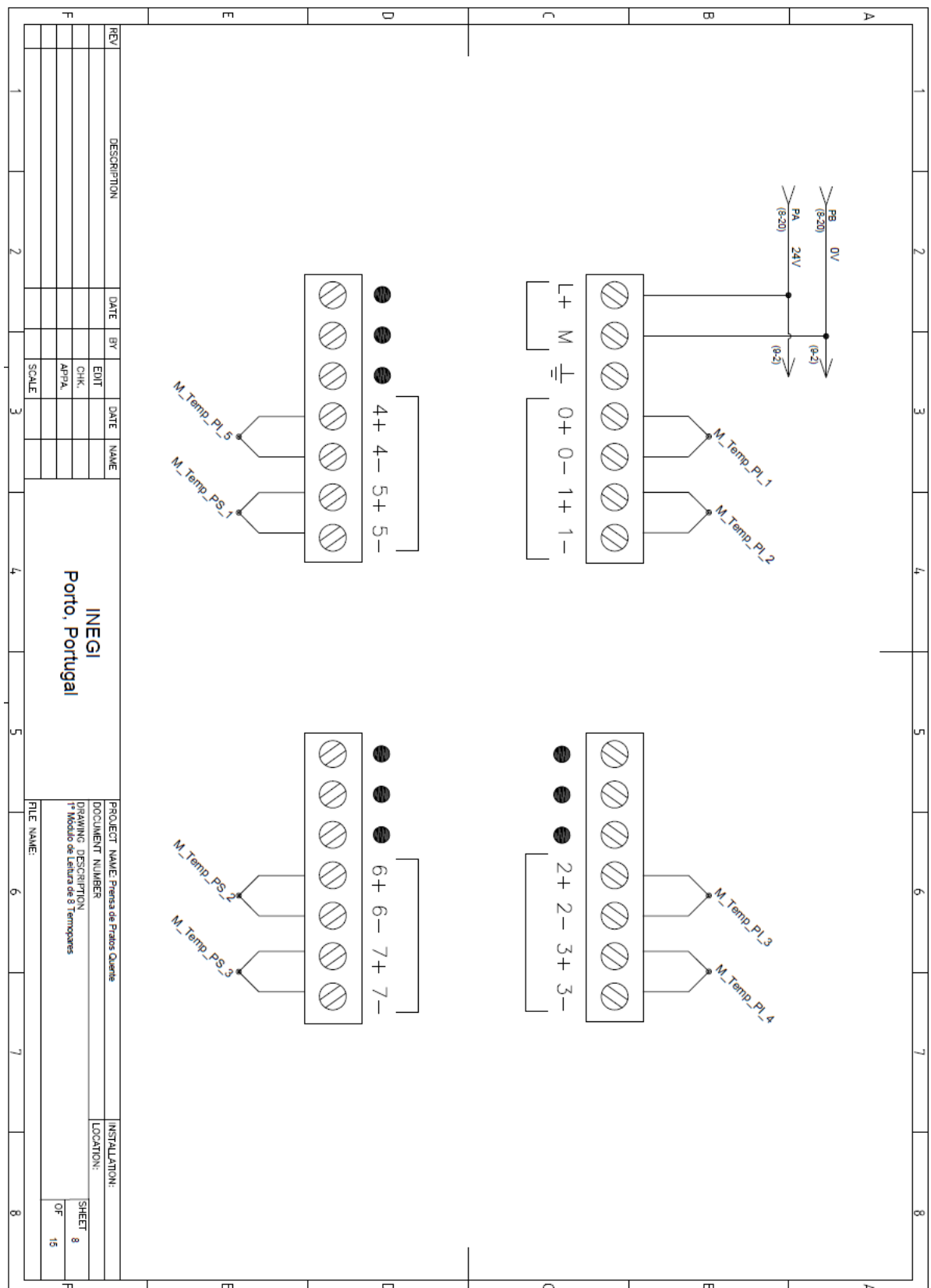


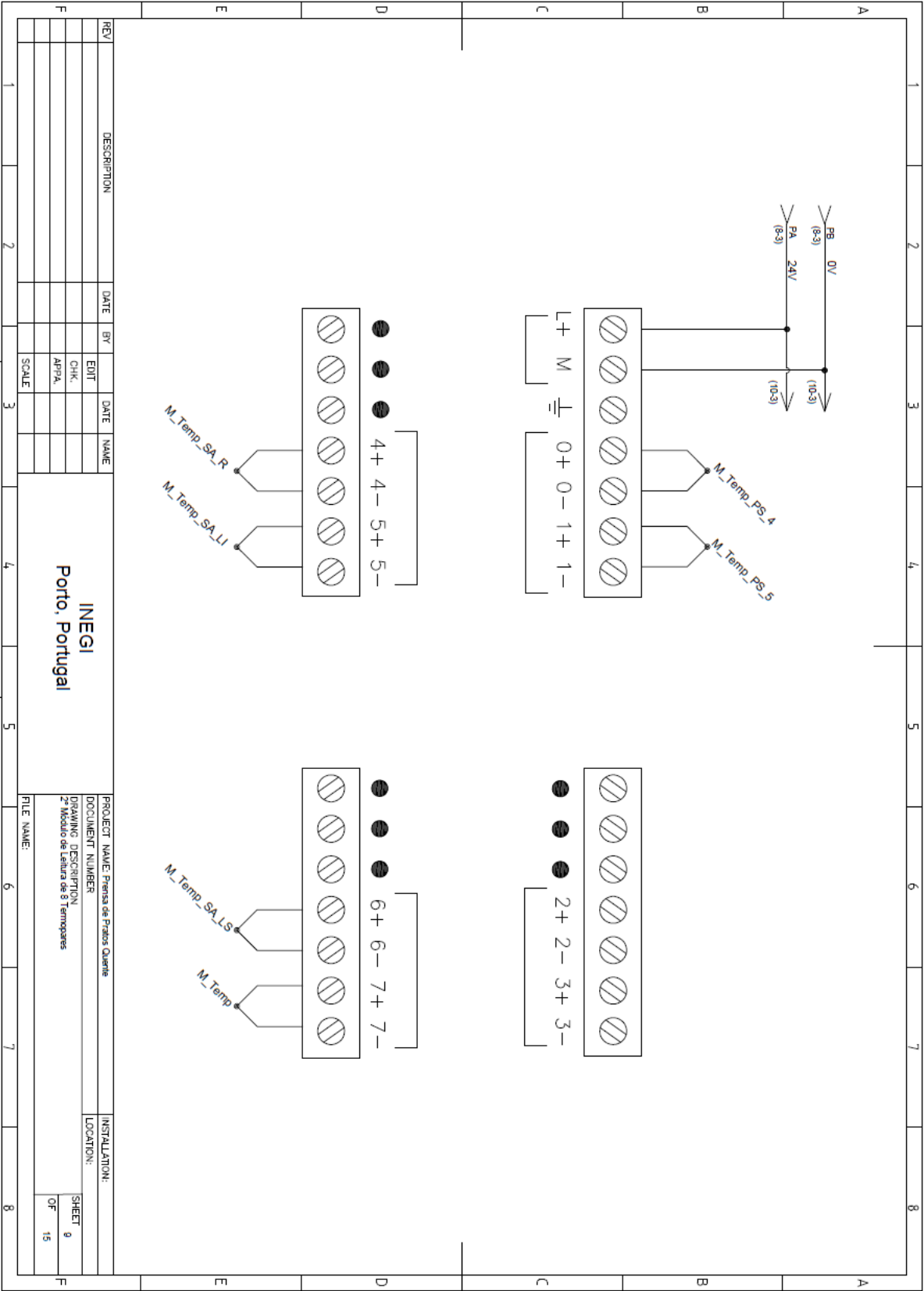


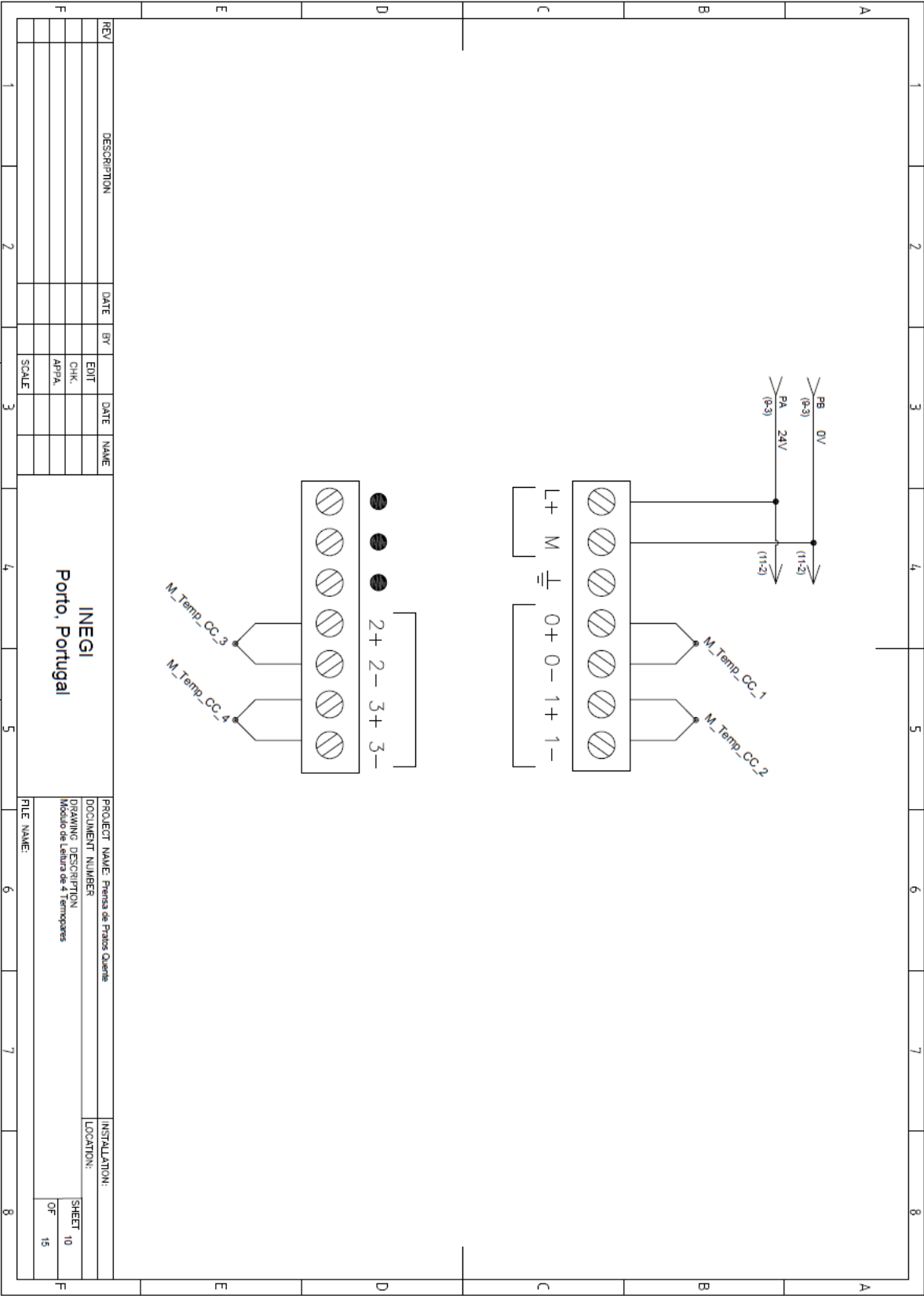


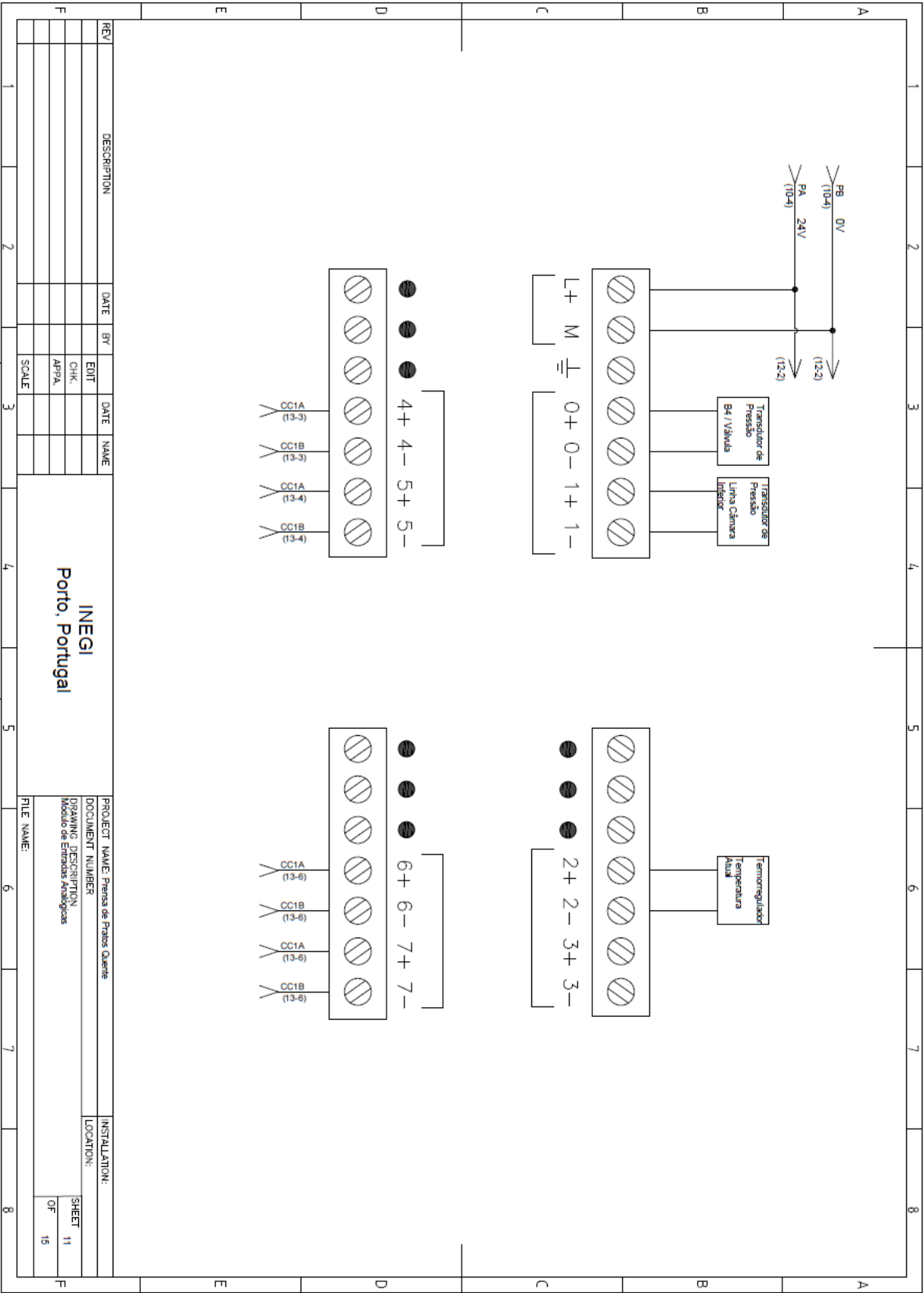


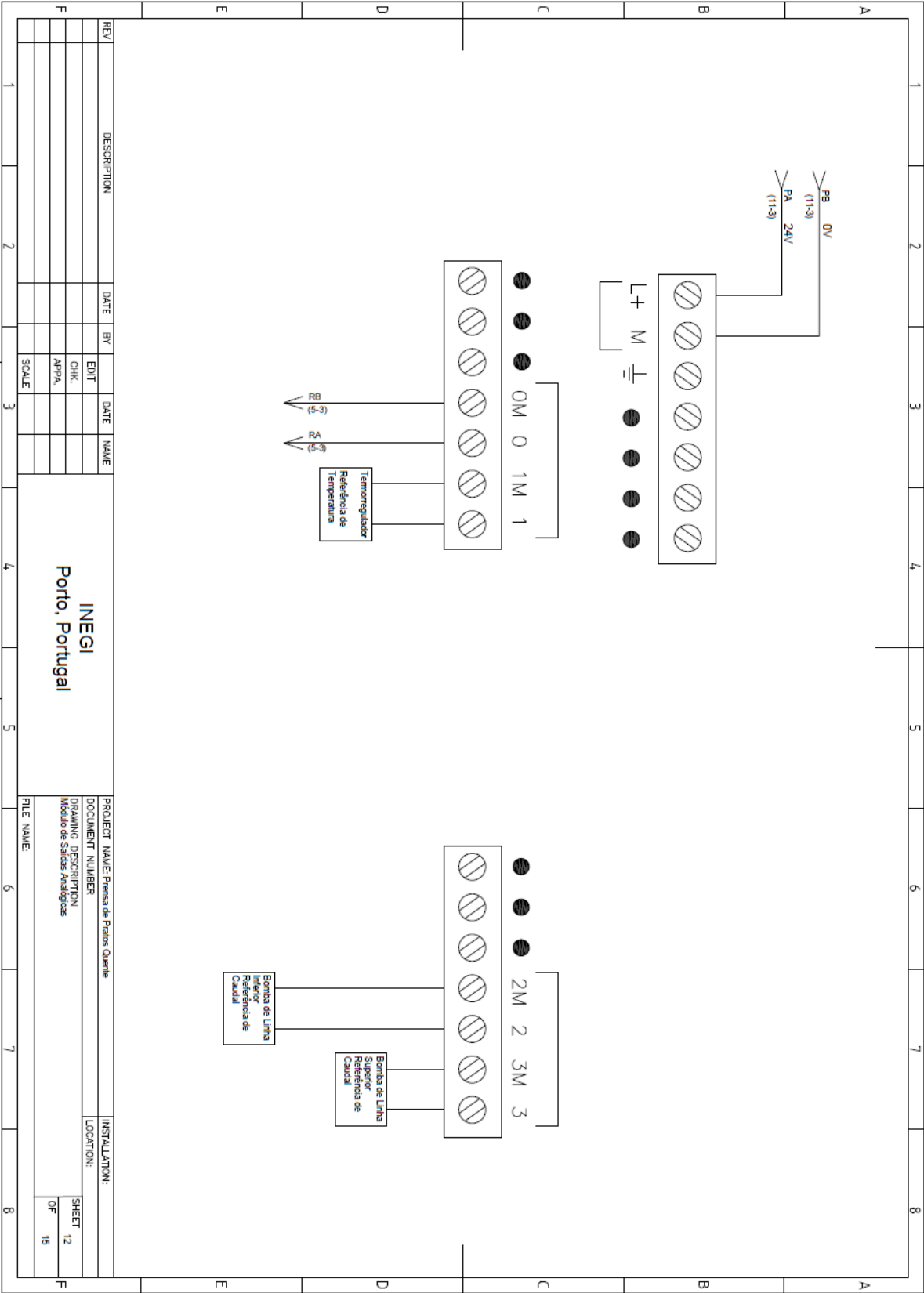


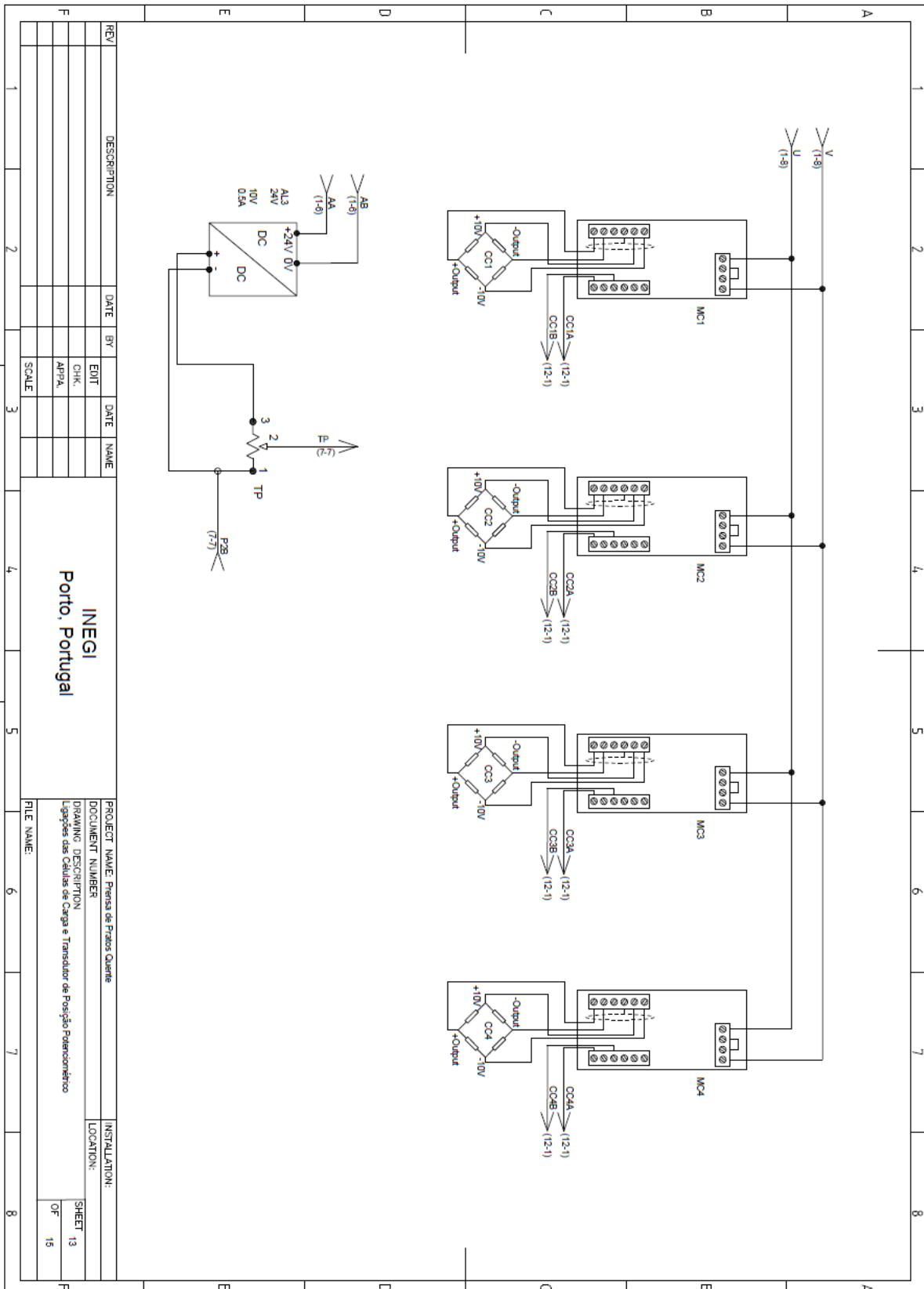












1		2		3		4		5		6		7		8	
A															

1															2															3															4															5															6															7															8														
A															B															C															D															E															F																																												
Nome															Referência															Designação															Fabricante																																																																										
LA															2966171															Relay PLC-RSC- 24DC/21 - 296617															Phoenix Contact																																																																										
LR															2966171															Relay PLC-RSC- 24DC/21 - 296617															Phoenix Contact																																																																										
LV															2966171															Relay PLC-RSC- 24DC/21 - 296617															Phoenix Contact																																																																										
M1															UD112MH A292948															Motor Trifásico de Indução de 4kW															Brook Crompton																																																																										
M2.1															TVF2-80M1-2															Motor Trifásico de Indução de 0.75kW															Yonlou																																																																										
M2.2															TVF2-80M1-2															Motor Trifásico de Indução de 0.75kW															Yonlou																																																																										
MC1															SG4-A															Amplificador Analógico para Célula de Carga															LCM Systems																																																																										
MC2															SG4-A															Amplificador Analógico para Célula de Carga															LCM Systems																																																																										
MC3															SG4-A															Amplificador Analógico para Célula de Carga															LCM Systems																																																																										
MC4															SG4-A															Amplificador Analógico para Célula de Carga															LCM Systems																																																																										
ML															800FM-KMC1															Seletor com Chave															Allen Bradley																																																																										
MS															RLY3-EMSS100															Módulo de Segurança															Sick																																																																										
PC															0.811.405.011															Placa Amplificadora para Válvula Proporcional															Bosch																																																																										
PF1															DNMS-4CD															Contactor de Porta de Segurança															OMRON																																																																										
PF2															MM46008-AKOG6m/H															Sensor Magnético Codificado															IFM																																																																										
Q0															S428KNA															Interruptor de carga															ABB																																																																										
R															800FP-R611															Botoneira Azul de Reset															Allen Bradley																																																																										
R1.1																														Resistência de Aquecimento de 1.5kW																																																																																									
R1.2																														Resistência de Aquecimento de 1.5kW																																																																																									
R1.3																														Resistência de Aquecimento de 1.5kW																																																																																									
R2.1																														Resistência de Aquecimento de 1.5kW																																																																																									
R2.2																														Resistência de Aquecimento de 1.5kW																																																																																									
R2.3																														Resistência de Aquecimento de 1.5kW																																																																																									
S1															800FP-F3															Botoneira Verde para Bi-Manual															Allen Bradley																																																																										
S2															800FP-F3															Botoneira Verde para Bi-Manual															Allen Bradley																																																																										
SA															800FP-LF3															Botoneira Verde para Arranque															Allen Bradley																																																																										
SP															800FP-LF4															Botoneira Vermelha para Paragem															Allen Bradley																																																																										
SSR1															10PCV/2415															Contactor de Estado Sólido 230V 15A															Crydom																																																																										
SSR2															10PCV/2415															Contactor de Estado Sólido 230V 15A															Crydom																																																																										
SSR3															10PCV/2415															Contactor de Estado Sólido 230V 15A															Crydom																																																																										
SSR4															10PCV/2415															Contactor de Estado Sólido 230V 15A															Crydom																																																																										
SSR5															10PCV/2415															Contactor de Estado Sólido 230V 15A															Crydom																																																																										
SSR6															10PCV/2415															Contactor de Estado Sólido 230V 15A															Crydom																																																																										
TO															Machine-Outlet 42674															Transformador 110V/ AC															legrand																																																																										
TP															MPT500															Transdutor de Posição Potenciométrico															MOULDPRO																																																																										
VFD1															VV/F801															Varidor de Frequência															Yonlou																																																																										
VFD2															VV/F801															Varidor de Frequência															Yonlou																																																																										
REV															DESCRIPTION															DATE															BY															DATE															NAME																																												