

Desenvolvimento de um controlador flexível para um servo sistema hidráulico

Adriana Sofia Monteiro de Oliveira

Dissertação de Mestrado

Orientador: Professor Doutor Francisco Jorge Teixeira de Freitas



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Julho, 2021

Aos meus pais, irmã, avó Júlia e avô Chico

Resumo

A definição de máquina, no geral, não se tem mantido constante ao longo dos anos. A permanente necessidade de aprimoramento dos componentes existentes tem vindo a demonstrar resultados tecnológicos muito promissores. Desta forma, as exigências impostas aos sistemas também se têm intensificado, bem como a quantidade de objetivos que se pretendem atingir com o seu desenvolvimento. As máquinas de ensaios, por não serem exceção, são, também, “exemplo” de grande importância de aplicação do desenvolvimento tecnológico associado ao progresso industrial.

Tendo por base a necessidade constante de incorporação de novas tecnologias, este estudo concentra-se no desenvolvimento de uma solução genérica para o comando de um sistema de ensaios caracterizado pela flexibilidade e modularidade no seu *hardware* e *software*, para que o mecanismo desenvolvido possa ser utilizado em várias aplicações como testes de fadiga, fluência, impacto, flexão e, certamente, compressão e tração.

A primeira etapa tida em consideração neste projeto passou por entender quais eram os requisitos base para a conceção do sistema de comando de uma máquina de ensaios.

Posteriormente, foi feita uma avaliação comparativa entre as tecnologias de acionamento hidráulica, elétrica e pneumática, seguida de um aprofundamento do assunto para a tecnologia servo-hidráulica e, conseqüentemente, para a utilização de válvulas hidráulicas proporcionais. De facto, a tecnologia hidráulica proporcional revelou-se ajustada para a aplicação em questão. Esta abordagem foi importante para entender a diferença entre estes conceitos e de que forma contribuem para o correto funcionamento de um sistema de ensaios.

Depois deste estudo inicial, foi analisado até que ponto os requisitos enunciados para o sistema de ensaio flexível eram cumpridos pela solução mais usada em máquinas de ensaio tradicionais. Através desta análise teve-se a percepção dos pontos negativos em termos estruturais, elétricos e computacionais, e que impedem a máquina de atingir os níveis de adaptabilidade pretendidos. Desta forma, iniciou-se o processo de desenvolvimento da nova solução.

Estruturalmente, é pertinente associar os componentes em módulos que, facilmente, possam estabelecer ligações flexíveis entre eles, quer mecânicas, hidráulicas ou elétricas. Deste modo, garante-se a capacidade de reconfiguração física adaptável aos diferentes ensaios que se possam planejar realizar.

Foram, assim, considerados três módulos complementares associados a um sistema de comando: a unidade energética, o eixo de atuação servo controlado e o sistema elétrico/informático de comando. Consideraram-se, também, três tipos alternativos de unidades hidráulicas que, devido à sua constituição, permitem realizar com maior ou menor eficácia o processo de controlo em força, em velocidade ou em posição. A constituição dos eixos de atuação é constante, mas, uma vez que apresentam capacidade para mais dois transdutores e mais duas válvulas, garantem a flexibilidade e adaptabilidade que se procura neste projeto.

Eletricamente, foi proposto um novo circuito elétrico e uma nova disposição do armário de comando e potência. As alterações efetuadas resultaram da implementação de novos componentes elétricos, tecnologicamente mais recentes. Por outro lado, foi importante encontrar uma configuração do sistema de comando elétrico/informático que permitisse trabalhar com o sistema à sua capacidade máxima, ou não, e que permitisse funcionar com cada uma das três soluções alternativas de unidades energéticas consideradas.

Por fim, foi feita uma proposta para a arquitetura do *software*. Este, por sua vez, deve-se ajustar às diferentes aplicações e configurações do sistema, podendo até ser considerado como um módulo autónomo. Nesta proposta expõem-se os requisitos que devem ser cumpridos por cada procedimento e apresentam-se exemplos de painéis que podem ser incorporados na HMI.

Development of a flexible controller for a servo hydraulic system

Abstract

The definition of machine, in general, has not remained constant over the years. The permanent need for improving existing components has shown to give very promising technological results. Hence, the requirements imposed on the systems have also been intensified, as well as the number of objectives that are intended to be achieved with their application. Testing machines are no exception to this reality and are an “example” of great importance in the technological development associated with industrial progress.

Based on the constant need for the incorporation of new technologies, this study focuses on the development of a testing system characterized by flexibility and modularity both in hardware and software, so that the developed mechanism can be used in various applications such as fatigue, creep, impact, compression, and tension testing.

The first step considered in this project was to understand the basic requirements for the design of a testing machine.

Subsequently, a discussion was made on the alternative drive technologies to be considered: hydraulic, electrical, and pneumatic. This led to a focus on servo-hydraulic technology and, consequently, on high performance proportional valves. In fact, proportional hydraulic technology has proved to be quite appropriate for testing systems applications. This approach was important for the understanding of the difference between these concepts and the way they can contribute for the correct functioning of a testing system.

After all this study, it was analysed to what extent the requirements set out for the flexible testing system were accomplished by traditional testing machines. This has allowed for a better understanding of the negative points in structural, electrical, and computational terms, which prevent traditional machines from reaching the intended levels of adaptability. In this way, the development process of a new proposal solution was initiated.

Structurally, it is pertinent to associate the components into modules that can easily establish flexible connections between them, whether mechanical, hydraulic, or electrical. This ensures the ability of physical reconfiguration adaptable to the tests planned to be carried out. Three modules were, therefore, considered: the power supply unit, the drive axis, and the electrical control panel. Three types of alternative hydraulic power supply units were considered which, due to their characteristics, allow for more adequate force, speed, or position control. The characterization of the actuators is not changed but since they have capacity to include two extra transducers and two extra valves, they guarantee flexibility and adaptability, for the application.

Electrically, a new electrical circuit and a new arrangement of the control and power panel have been proposed. These changes were a natural consequence of the application of new electrical components, which are technologically update. On the other hand, it was important to find a building solution that would allow working with the system to its maximum properties, or not, and which would allow it to operate with any of the three power supply units considered.

Finally, a proposal was put forward for the software architecture. This, in turn, was conceived to fulfill the objective of being adaptable to the different applications and system configurations, and even be regarded to be considered as a module. This proposal specifies the requirements that must be met by each procedure and puts forward examples of panels that can be incorporated into the HMI for this purpose.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Francisco Jorge Teixeira de Freitas, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pela partilha de conhecimentos e pela disponibilidade que demonstrou para me acompanhar na última etapa deste desafio de 5 anos.

Aos meus colegas de curso, Domingos Pinheiro e Luís Freitas por me terem acompanhado, todos os dias desta dissertação, e por todos os bons momentos passados no laboratório de óleo-hidráulica.

Ao Sr. Joaquim Silva pelo apoio e permanente disponibilidade para ajudar com todo o seu conhecimento e prática.

A todos os meus colegas de laboratório que sempre se mostraram disponíveis para ajudar e, para além dos momentos de trabalho, também partilharam comigo momentos de alegria e convívio nos vários almoços organizados.

Ao Nuno Nogueira por ter estado sempre presente e me ter apoiado em todos os momentos.

Um agradecimento especial aos meus pais, irmã, avó Júlia e avô Chico pelo constante incentivo para alcançar todos os meus objetivos, nunca duvidando da minha capacidade para enfrentar todos os momentos menos bons.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos do projeto.....	2
1.3	Motivação para o desenvolvimento do projeto	2
1.4	Estrutura da dissertação	2
2	Enquadramento da evolução dos sistemas de ensaio	4
2.1	Contextualização	4
2.2	Flexibilidade e modularidade.....	4
2.3	Requisitos base para a construção de uma máquina de ensaios.....	5
2.4	Comparação entre tecnologias	6
2.5	Sistemas servo-hidráulicos.....	9
2.6	Válvulas hidráulicas proporcionais.....	11
2.7	Máquinas de Ensaio de Referência	14
2.8	Do passado tradicional ao presente tecnológico	21
2.9	Sistemas de ensaio flexíveis.....	22
2.10	Exemplo de um sistema de ensaio flexível	23
2.10.1	Caracterização estrutural	23
2.10.2	Caracterização elétrica.....	24
3	Desenvolvimento de propostas para sistemas de ensaio flexíveis.....	26
3.1	Requisitos funcionais para o sistema de ensaios proposto.....	26
3.2	Configuração de um Eixo	28
3.3	Configuração de uma Unidade energética	29
3.3.1	Unidade Energética do “Tipo I”	30
3.3.2	Unidade energética “Tipo II”.....	40
3.3.3	Unidade energética do “Tipo III”	42
3.4	Controlo de força	45
3.5	Estudo das tecnologias atuais.....	47
3.5.1	Computador vs. Autómato.....	48
3.5.2	Motores elétricos	50
3.5.3	Segurança.....	52
3.6	Desenvolvimento da solução elétrica – seleção de componentes.....	52
3.6.1	Autómato	53
3.6.2	Módulos de expansão	54
3.6.3	Fontes de alimentação.....	55
3.6.4	Disjuntores.....	55
3.6.5	Contactores.....	56
3.6.6	Relé de segurança	56
3.6.7	Variador de velocidade	57
3.6.8	<i>Soft Starter</i>	57
3.6.9	UPS	57
3.7	Esquemas elétricos.....	58
3.8	Quadro elétrico.....	59
3.8.1	Regras de construção	60
3.8.2	<i>Layout</i>	61
3.9	Solução <i>Ethernet</i>	64
4	Arquitetura do <i>software</i>	65
4.1	Estrutura global.....	65
4.2	Interface com o utilizador	69

4.3	Requisitos de programação.....	70
4.3.1	Menu de apresentação/Login	70
4.3.2	Definições do utilizador	73
4.3.3	Menu Inicial	74
4.3.4	Grupos Hidráulicos	76
4.3.5	Base de dados	77
4.3.6	Calibrações	81
4.3.7	Pré-carga e pré-posicionamento	84
4.3.8	Monitorização	86
4.3.9	Modo Manual	87
4.3.10	Modo de ensaio	89
4.4	Registo de dados.....	95
5	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	96
5.1	Conclusões.....	96
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	97
	Bibliografia	99
	ANEXO A: Esquema Elétrico	102
	ANEXO B: Ligações entre os quadros elétricos.....	117
	ANEXO C: <i>Layouts</i>	122
	ANEXO D: <i>Graficets</i> /Mensagens.....	126

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Curvas limites de potência das tecnologias eletro-hidráulica, eletromecânica e eletropneumática para acionamento em função da resposta dinâmica [9].	8
Figura 2.2 - Representação da estrutura de um motor elétrico linear [10].	9
Figura 2.3 – Aplicações assinaladas por zonas definidas por potência em função da resposta dinâmica, que utilizam tecnologia servo-hidráulica [11].	11
Figura 2.4 - Curvas de histerese com e sem controlo de posição e com <i>Dither</i> [11].	12
Figura 2.5 - Esquema base de um servomecanismo.	15
Figura 2.6 - Circuito hidráulico com bomba de cilindrada fixa.	16
Figura 2.7 - Curva de eficiência energética em função da carga relativa.	17
Figura 2.8 - Circuito hidráulico com bomba de cilindrada variável e acumulador [8].	19
Figura 2.9 - Constituição física de um eixo hidráulico servo comandado.	24
Figura 3.1 - a) Máquina servo-hidráulica de ensaios de fadiga; b) Servo atuador;	27
Figura 3.2 – a) Unidade hidráulica “tipo I” sem acumulador. b) Unidade hidráulica “tipo I” com acumulador.	30
Figura 3.3 - Diagrama de blocos para controlo de posição.	32
Figura 3.4 - Diagrama de blocos com a respetiva função de cada componente.	32
Figura 3.5 - Compensador para ajuste do comando do controlador à válvula direcional de elevado desempenho proporcional.	33
Figura 3.6 - Relação entre a percentagem de caudal e a percentagem de sinal de comando, segundo o tipo de gaveta da válvula [16].	35
Figura 3.7 - Esboço do circuito hidráulico com atuador assimétrico em avanço e válvula proporcional de elevado desempenho simétrica.	36
Figura 3.8 - Caudal de P para B ou A para T em função da queda de pressão de P para T [16].	37
Figura 3.9 - Esboço do circuito hidráulico com atuador assimétrico em recuo e válvula proporcional de elevado desempenho simétrica.	38
Figura 3.10 - Esboço do circuito hidráulico com atuador simétrico em avanço e válvula proporcional de elevado desempenho simétrica.	39
Figura 3.11 - Esboço do circuito hidráulico com atuador simétrico em recuo e válvula proporcional de elevado desempenho simétrica.	39
Figura 3.12 – a) Unidade hidráulica tipo II com dois transdutores para medição da pressão na carga. b) Unidade hidráulica tipo II com um transdutor para a medição da pressão na carga.	40
Figura 3.13 - Solução hidráulica tipo III.	43
Figura 3.14 - Diagrama de blocos para o controlo de força.	46
Figura 3.15 - Variação da pressão à entrada e saída do atuador em função do deslocamento da gaveta da válvula direcional proporcional de elevado desempenho [16].	47
Figura 3.16 - Gráfico corrente/velocidade para arranque direto, arranque em estrela-triângulo, arranque com <i>soft starter</i> e arranque com variador de velocidade [21].	50
Figura 3.17 – Famílias de componentes que, habitualmente, constituem um armário elétrico.	62
Figura 3.18 - <i>Layout</i> do quadro elétrico de comando.	63
Figura 4.1 - Proposta de diagrama de estados do <i>software</i> .	67
Figura 4.2 - Fluxograma do funcionamento base da aplicação.	68
Figura 4.3 - Menu de apresentação.	71
Figura 4.4 - <i>Login</i> para entrar na aplicação.	71
Figura 4.5 - <i>Login</i> validado. Está disponível o “Menu Inicial” da aplicação.	72
Figura 4.6 - <i>Grafcet</i> de funcionamento do menu de apresentação/login na aplicação.	72
Figura 4.7 - Ferramentas do utilizador.	73
Figura 4.8 - Menu para alteração da palavra-passe	74
Figura 4.9 - Janela de configuração do utilizador.	74

Figura 4.10 - “Menu Inicial”	75
Figura 4.11 - <i>Grafcet</i> de funcionamento do “Menu Inicial.	75
Figura 4.12 - Menu para criar, editar ou interditar Grupos Hidráulicos.....	77
Figura 4.13 - Menu de acesso à “Base de Dados”.....	78
Figura 4.14 - <i>Grafcet</i> de funcionamento do menu base de dados.	78
Figura 4.15 - Menu Calibração - Seleção do transdutor.....	84
Figura 4.16 - Menu Calibração - Execução da calibração.....	84
Figura 4.17 - Menu de pré-carga.	86
Figura 4.18 - Menu de monitorização.	87
Figura 4.19 - Menu de funcionamento em “modo manual”.	88
Figura 4.20 - Menu de funcionamento em “modo de ensaio”	90
Figura 4.21 – Menu “Criar Ensaio”	91
Figura 4.22 - Menu de “definição das trajetórias” para cada eixo.	92
Figura 4.23 - Menu para “alteração das características” das trajetórias.	92
Figura 4.24 - Menu relativo às “condições de paragem” para rutura.	93
Figura 4.25 - Menu relativo às “condições de paragem” por valor de transdutor.	93
Figura 4.26 - Menu “Executar Ensaio”.	95

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Componentes que constituem o eixo.....	24
Tabela 3.1 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização de um eixo.....	29
Tabela 3.2 - Componentes da unidade energética tipo I, na versão com acumulador b).	30
Tabela 3.3 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização da unidade energética tipo I.	31
Tabela 3.4 - Componentes da unidade energética tipo II.	41
Tabela 3.5 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização da unidade energética tipo II.	41
Tabela 3.6 - Componentes da unidade energética tipo III.	44
Tabela 3.7 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização da unidade energética tipo III.	44
Tabela 3.8 - Módulos de expansão I/O para diferentes configurações do sistema de ensaio...54	
Tabela 3.9 - Características dos componentes selecionados para o quadro elétrico.	59
Tabela 3.10 - Indicação das famílias de componentes assinaladas na figura 3.17.	62
Tabela 4.1 - Níveis de acesso dos utilizadores.	73

Siglas e Acrónimos

AC	Alternating Current
CE	Conformité Européenne
DC	Direct Current
FAI	Fonte de Alimentação de Instrumentação
FAP	Fonte de Alimentação de Potência
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HMI	Human Machine Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IIOT	Industrial Internet Of Things
IPC	Industrial Personal Computer
LED	Light Emitting Diode
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller
QEI	Quadro Elétrico de Interface
QEUH	Quadro Elétrico da Unidade Hidráulica
RAM	Random Access Memory
RJ45	Registered Jack – 45
SFLT	Sistema Flexível de Ligação de Transdutores
SQL	Structured Query Language
UPS	Uninterruptible Power Supply
VAC	Volts Alternating Current
VDC	Volts Direct Current
VFD	Variable Frequency Drive
VSD	Variable Speed Drive
A_1	Área da câmara principal do atuador
A_2	Área da câmara secundária do atuador
A_A	Área genérica do atuador
C_c	Célula de carga
C_d	Coeficiente de descarga
F	Força externa exercida no atuador
F_A	Força do atuador
I	Corrente
p_L	Pressão da carga
p_P, p_T, p_A, p_B	Pressão nos orifícios das válvulas indicados pelo índice
p_s	Pressão da fonte
q_L	Caudal da carga
Q_1, Q_2	Caudal da câmara principal e secundária, respetivamente
Q_A	Caudal genérico do atuador
Q_{nom}	Caudal nominal
q_s	Caudal da fonte
T_D	Transdutor de posição
Tp_P, Tp_A, Tp_B, Tp_C	Transdutores de pressão
U_A	Valor de tensão para comando da válvula direcional
$U_{A\ comp}$	Valor de tensão compensado para comando da válvula direcional
V_A	Tensão enviada pelo autómato
V	Tensão
v_A	Velocidade do atuador
$V_{máx}$	Tensão máxima enviada pelo atuador

v_{ref}	Velocidade de referência
x_A	Posição do atuador
x_v	Deslocamento da gaveta da válvula direcional
$x_{vmáx}$	Deslocamento máximo da gaveta da válvula direcional
$\Delta p_{A \rightarrow T}, \Delta p_{P \rightarrow T}$	Variação de pressão entre os orifícios indicados em índice
$\Delta p_{P \rightarrow A}, \Delta p_{B \rightarrow T}, \Delta p_{P \rightarrow B},$	
Δp_{nom}	
Δp_L	Variação de pressão nominal
	Variação de pressão na passagem pela válvula direcional
	proporcional de elevado desempenho
$\eta_{sistema}$	Rendimento do sistema
ρ	Massa volúmica
ϕ_v	Diâmetro da gaveta da válvula direcional
τ	Constante de tempo

1 Introdução

Neste primeiro capítulo é feita uma contextualização do progresso tecnológico a nível industrial, e de que forma as empresas conseguem responder a essa evolução. De seguida, particulariza-se o impacto que os avanços tecnológicos têm sobre as máquinas de ensaio, uma vez que estas são o assunto principal deste estudo. Por fim, são definidos os objetivos desta dissertação e a motivação para a sua realização.

1.1 Enquadramento

Face aos desenvolvimentos industriais verificados nos últimos anos e aos alicerces que suportam esses desenvolvimentos, conceitos como flexibilidade e modularidade têm ganho destaque nas aplicações industriais. Numa primeira instância não é possível dissociar conceitos como indústria e economia, bem como diversidade e evolução. Cada vez mais a relação custo/qualidade se sobressai a outras possíveis dicotomias. Assim, com o avanço das novas tecnologias e, de certa forma, da premência do conceito de Indústria 4.0, há cada vez maior receptividade para o surgimento de máquinas tecnicamente mais evoluídas e, aparentemente, mais heterogêneas.

O constante acompanhamento por parte da indústria da evolução tecnológica que se tem sentido, acarreta inúmeras vantagens, tais como o aumento da qualidade dos produtos, rapidez de resposta nos processos de fabrico, agilização na comunicação entre máquinas ou entre máquinas e operadores e facilidades de comando em tempo e em espaço. Por estas razões, a elaboração de um sistema capaz de criar uma ponte entre as tecnologias do presente e aquelas que se perspetivam para o futuro é uma mais-valia para uma empresa. Esta adaptabilidade aos constantes avanços tecnológicos assenta, maioritariamente, na automatização das máquinas e na digitalização dos processos.

Os sistemas de ensaio que serão estudados no decorrer deste documento, não são exceção aos aspetos referidos anteriormente. Por esse motivo, o desenvolvimento de uma máquina que apresente um controlador com uma estrutura modular e flexível a diferentes exigências torna-se bastante atrativo para a indústria.

A automatização referida anteriormente apenas é possível devido aos progressos dos componentes elétricos, da implementação de autómatos e da evolução das Interfaces Homem-Máquina (HMI). Todos os componentes, atualmente, suportam redes de comunicação, como *Ethernet*, que lhes permitem combinar as suas capacidades e, de certa forma, reduzir o volume de cablagem da própria solução elétrica.

1.2 Objetivos do projeto

Este projeto - “Desenvolvimento de um controlador flexível para um servo sistema hidráulico” - foi realizado no Laboratório de Óleo-hidráulica, inserido no Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. Nesse mesmo local encontra-se um modelo de um sistema de ensaios, incorporado com o *software Dynatester*, que permite testar e controlar o movimento de um servo atuador eletro-hidráulico, tanto em força como em posição. Esta solução foi considerada como uma referência para o presente desenvolvimento.

A presença do sistema para este estudo, de certa forma, agilizou todo o processo de compreensão do seu mecanismo, bem como dos requisitos a ter em consideração tanto a nível de *software* como de *hardware*. Desta forma, a percepção das exigências a que se devem submeter os sistemas de ensaio em desenvolvimento, surgiram de uma forma muito mais cognoscível. A presença destas máquinas é ainda bastante útil em termos académicos e industriais. Por outro lado, estas podem apresentar diversas configurações físicas e até mesmo ao nível da programação, pelo que se revela extremamente ambicioso o desenvolvimento de um sistema que acompanhe as evoluções tecnológicas e que continue com todas as capacidades de modularidade e de flexibilidade.

Assim, foi proposto o desenvolvimento de uma nova solução de um servo sistema hidráulico com a capacidade de se adaptar a diferentes realidades em termos de *hardware*, e dotado de um *software* de controlo flexível, com atenção complementar a eficiência energética e a segurança funcional. Perspetiva-se, desta forma, a conceção de um sistema abrangente para cumprir os requisitos de diferentes tipos de ensaios.

1.3 Motivação para o desenvolvimento do projeto

Numa primeira instância, e ainda com um pensamento inconsciente perante a atualidade, um sistema com capacidades abrangentes como aquelas que se pretendem alcançar neste estudo, e que serão abordadas no capítulo 2 deste documento, transparece uma certa dificuldade na realização das tarefas, pois rapidamente se deve adaptar às características de cada ensaio. Contudo, face ao grande desenvolvimento dos componentes elétricos, da programação e até das comunicações, o pouco provável e executável de anos atrás passou rapidamente para uma utilização recorrente no nosso quotidiano. Desta forma, as indústrias cada vez mais se submetem ao poder das novas tecnologias, uma vez que lhes garantem, à partida, uma maior gama de aplicações.

Deste modo, o tema desta dissertação imediatamente captou o desejo de explorar e aprofundar o mundo das soluções elétricas e de controlo que podem e devem ser aplicadas. Por outro lado, como já foi referido anteriormente, o assunto é extremamente atual para o meio industrial o que, de certa forma, estabelece uma aproximação do estudo aqui desenvolvido ao mundo laboral.

Pelas razões apresentadas anteriormente, e nunca esquecendo a constante ansiedade de querer contactar com desafios industriais, desenvolveu-se uma grande motivação e predisposição para se mergulhar neste tema.

1.4 Estrutura da dissertação

O desenvolvimento de uma solução de comando e controlo, para um sistema de ensaios flexível, feito neste documento, encontra-se dividido em 4 capítulos.

Este primeiro capítulo é utilizado para enquadrar o tema da dissertação relativamente aos progressos tecnológicos e às novas exigências funcionais, chamando a atenção para a necessidade de inserir o sistema de ensaios flexíveis nos conceitos e perspetivas que dominam, atualmente, a indústria.

No capítulo 2, o principal objetivo passa por organizar os requisitos que se pretendem satisfazer com a conceção de um sistema de ensaios flexível. A elaboração desses requisitos, por sua vez, foi feita de forma progressiva. Assim, foi importante começar por conhecer e entender que conceitos dominam o dicionário industrial, hoje em dia. Por esta razão, exploraram-se termos como flexibilidade e modularidade e de que forma estes podem ser aplicados num mecanismo. Posteriormente, fez-se uma análise, ainda que generalizada, dos requisitos para a conceção de uma máquina de ensaios e efetuou-se uma comparação entre as tecnologias pneumática, hidráulica e eletromecânica. Para compreender o motivo de algumas necessidades que o sistema de ensaios flexível deve cumprir, descreveram-se as características associadas às máquinas de ensaio de referência. Deste modo, mais facilmente se tem percepção dos pontos negativos deste mecanismo, permitindo a elaboração de uma discussão acerca de eventuais soluções para os problemas encontrados.

Depois de estabelecidos todos os requisitos do sistema de ensaios, o desenvolvimento da nova proposta inicia-se no capítulo 3, onde se descreve a diversidade de soluções de constituição do *hardware* do mecanismo, em termos de unidades energéticas e de eixos. Por conseguinte, dependendo da configuração e constituição de cada módulo do sistema de ensaios é descrito o procedimento de controlo em força, em velocidade e em deslocamento, que a aplicação deve ter em consideração. O estudo das estratégias de controlo é fundamental para entender até que ponto o sistema é considerado flexível. Ainda neste capítulo, são explicados quais os componentes elétricos que devem ser inseridos nos armários, procedendo-se para a seleção dos mesmos. De seguida, apresentam-se os respetivos esquemas elétricos e o *layout* do armário de comando e potência, mais uma vez, adaptado às diferentes configurações de *hardware*.

Por fim, é feita no capítulo 4 a descrição da proposta de arquitetura do *software* do sistema. Neste ponto é apresentada a estrutura considerada necessária para a aplicação para que esta consiga dar resposta às flexibilidade e modularidade da máquina, explicando-se as condições e obrigações de cada menu. A acompanhar essa descrição estão exemplos de possíveis interfaces com o utilizador e a listagem das mensagens que devem ser trocadas entre este e a aplicação.

2 Enquadramento da evolução dos sistemas de ensaio

2.1 Contextualização

Muito se debate, hoje em dia, se nos encontramos envolvidos pela 4ª Revolução Industrial. Efetivamente, os acontecimentos que determinaram as passagens pelas primeira, segunda e terceira revoluções industriais foram muito mais impactantes em termos de alteração física das sociedades de cariz industrial, o que promoveu maior noção de evolução. Todas estas revoluções tentaram acompanhar as exigências do mercado, fundamentalmente, com tecnologias que iam surgindo no quotidiano. Assim, a 1ª Revolução Industrial está associada ao surgimento da máquina a vapor que agilizou a necessidade de mão-de-obra e aumentou a capacidade de produção das empresas. Alcançaram-se, desta forma, níveis de produção até então limitados pelas capacidades humanas. Posteriormente, o avanço tecnológico contínuo e a modernização dos equipamentos que foram surgindo desde a primeira revolução, marcaram a passagem pela 2ª Revolução Industrial. Deve-se ainda notar que o aparecimento do tapete transportador nas fábricas e de um aprimoramento na divisão do trabalho, registou, novamente, um aumento na produtividade. Por fim, a 3ª Revolução Industrial marcou o início da automatização de processos nas diferentes áreas industriais, investindo-se em novos setores como a robótica, a informática e a eletrónica [1].

Um olhar amplo relativamente ao desenvolvimento do mundo industrial pode afirmar e salientar que este assenta na filosofia causa-efeito. De facto, a ambição do Homem em encontrar novas soluções para os problemas, apostar em constantes melhorias do que já existe e arriscar em novos conceitos provocou um drástico desenvolvimento tecnológico. Por sua vez, o utilizador dessas tecnologias, por vezes de forma inconsciente, submeteu-se às comodidades da atualidade o que aprimorou as suas exigências, colocando-as em patamares elevados. A nossa constante insatisfação é, portanto, o gatilho para o progresso contínuo.

Hoje em dia, conceitos como eficiência energética, flexibilidade, modularidade, inteligência das máquinas e reconfiguração são uma constante no dicionário industrial a par da contínua necessidade imperativa de garantir a segurança de operadores de equipamentos.

Desta forma, estando este projeto inserido nesta era da Indústria 4.0, não é possível escapar a estes termos, pelo que lhes é dada adequada atenção, seguidamente.

2.2 Flexibilidade e modularidade

Atualmente, a palavra que vigora no mundo industrial é “flexibilidade” e a consequente adaptabilidade das máquinas e dos processos. A capacidade de adaptação de uma máquina a diferentes situações sempre tentando preservar a sua eficácia, é algo que cativa o utilizador [2]. De certa forma, a 4ª Revolução Industrial, também conhecida por Indústria 4.0 e Internet das Coisas (IIoT – *Industrial Internet of Things*), tenta reunir as condições necessárias para tornar

uma máquina o mais abrangente possível. Importa salientar que o grande pilar da Indústria 4.0 trata-se da inerente capacidade de comunicação automática estabelecida entre diversos componentes e níveis da pirâmide industrial, permitindo uma comunicação ponto-a-ponto entre os elementos de uma rede [3].

Ao longo dos anos, o crescimento da atividade industrial fez aumentar tanto a competição entre empresas, como a procura pelos mais diversos produtos. Por este motivo, o mercado imprevisível, instável e de rápida mudança em que se vive tem afetado economicamente muitas empresas. O conceito de máquina modular surge com o intuito de, a partir de um módulo base se poder adaptar/completar, posteriormente, com outros módulos de forma a satisfazer os requisitos exigidos, utilizando interfaces *standard* que permitam definir o fluxo de informação entre os mesmos. Economicamente, esta solução parece ser rentável no sentido em que não se investe em máquinas que apenas foram planeadas para uma certa aplicação, mas sim em módulos que, dependendo de como são associados, podem exercer as mais diversas funções [4].

Portanto, a utilização de produtos modulares é um dos grandes pré-requisitos para o desenvolvimento de uma indústria customizada em massa e com tempos de produção reduzidos que permita alcançar flexibilidade nos processos em constante mudança. A modularidade deve ainda garantir diferentes configurações do produto final, rapidez na mudança dos módulos e, consequentemente, redução dos custos de alteração. Neste sentido, cria-se uma incapacidade para a dissociação dos termos flexibilidade e modularidade. A abordagem de uma estratégia governada pela flexibilidade é, geralmente, prescrita a empresas que enfrentem processos dinâmicos expostos à necessidade de se manterem a par dos avanços tecnológicos e técnicos [5].

A introdução do conceito de Indústria 4.0 no ambiente laboral segue algumas abordagens, como:

- Capacidade de produção paralela às exigências do mercado, obtendo-se produtos viáveis num curto espaço de tempo;
- Rápida integração de processos tecnológicos modernos e novas funções nos sistemas de produção existentes, registando-se uma fácil adaptação às constantes mudanças dos lotes de produtos;
- Unidades de produção integradas com novas capacidades de serviço assentes na *IIoT*, o que facilita o acesso a qualquer informação apenas com ligação à *internet* que, para serem satisfeitas, geralmente obrigam a empresa a submeter-se aos dois conceitos aqui explorados [6].

O fluído desenvolvimento dos componentes elétricos e eletrónicos faz sobressair a facilidade com que estes ficam obsoletos à medida que são desenvolvidas soluções com integrações informáticas programáveis ou parametrizáveis. Desta forma, um processo considerado eficiente, rapidamente, pode revelar-se desatualizado. Assim, uma atenção constante aos conceitos de flexibilidade, modularidade e reconfiguração dos sistemas de produção é fundamental para que as máquinas continuem atuais e satisfaçam as exigências da atualidade [6].

2.3 Requisitos base para a construção de uma máquina de ensaios

No desenvolvimento de novos produtos, a realização de ensaios de caracterização e de validação das suas propriedades representa uma atividade muito importante em trabalhos de investigação e da área da qualidade. De facto, estes dois setores, beneficiando do conhecimento do comportamento de materiais e de produtos alicerçado na validação de modelos

experimentais, aportam um maior valor acrescentado e uma otimização económica de produtos, bem como a garantia da sua conformidade com os crescentes requisitos de segurança. Por estas razões, desde sempre se reconheceu a importância do desenvolvimento de máquinas com capacidades para ensaiar um determinado produto em estudo, com a finalidade de poder avaliar o seu desempenho ao longo da sua vida útil. Os ensaios habitualmente pretendidos podem ser divididos em estáticos e dinâmicos.

Podem ser considerados estáticos aqueles que sujeitam provetes a solicitações de variação muito lenta no tempo, induzindo sucessivos e constantes estados de equilíbrio e fazendo com que o tempo não seja uma variável condicionadora do resultado de um ensaio. Nesta categoria podem-se englobar os ensaios estáticos de tração, de compressão ou de flexão e certamente os de fluência de materiais. Relativamente aos ensaios dinâmicos, estes caracterizam-se por uma solicitação rápida e cíclica, como acontece nos testes de fadiga ou de impacto.

Genericamente, uma máquina de ensaio é uma máquina de elevada qualidade funcional que, sendo perspectivada para ensaios de índole mecânica é apreciada pela qualidade da capacidade de controlo de movimentos sob controlo de força, sob controlo de velocidade ou em controlo de deslocamento ou de posição.

Isto garante ao utilizador uma aptidão para, de forma mais direta, posicionar com precisão, realizar um movimento com um perfil rigoroso independentemente da carga associada, ou de exercer uma carga com elevado rigor, independentemente da velocidade requerida pela aplicação. Em muitas situações, o ensaio mecânico de um produto pode exigir movimentos apenas com um eixo, mas ensaios multi-eixo são igualmente importantes, o que impõe, por um lado, maiores requisitos funcionais aos sistemas, fundamentalmente no acionamento e controlo dos movimentos, e às suas capacidades físicas estruturais. Muitas vezes os ensaios multi-eixo exigem relações entre eles, tal como sincronismos de posições ou de deslocamentos, ou mesmo igualdade de velocidades.

Para o cumprimento dos requisitos em geral colocados pelas exigências de ensaios, reconhece-se que as soluções envolvendo o controlo de movimentos realizado por fluidos sujeitos a elevada pressão, são adequadas a essas aplicações, tal como será analisado nos próximos tópicos. Deste modo, a questão atual não se centra somente na qualidade do funcionamento do que foi desenvolvido, mas sim na exequibilidade, facilidade e rapidez na execução dos ensaios, bem como na gestão e organização dos resultados deles obtidos.

A tecnologia servo-hidráulica tem vindo a demonstrar, já ao longo de muitas décadas, a sua capacidade e adequabilidade para ser um meio relevante de transmissão e controlo de movimento em sistemas de ensaio exigentes e de elevado desempenho. De forma a compreender melhor esta afirmação, o subcapítulo 2.4 compara as diferentes tecnologias capazes de serem usadas atualmente.

2.4 Comparação entre tecnologias

A decisão da tecnologia mais adequada para o acionamento e controlo de movimento de um determinado mecanismo requer um conhecimento profundo das áreas em que estas são utilizadas. Por outro lado, os critérios de seleção que se devem destacar são, tradicionalmente, entre outros:

- Desempenho do equipamento;
- Tamanho e peso;
- *Duty cycle*;
- Meio envolvente: vibrações, choques, temperatura (...);

- Custo.

Apesar de em muitas situações o fator custo ser o que representa maior peso numa decisão final, para máquinas de ensaio é particularmente mais importante assegurar um bom desempenho e qualidade nos movimentos pretendidos. Desta forma, se um maior investimento financeiro assegurar o aumento requerido na qualidade do ensaio, o custo não poderá ser uma limitação.

A tecnologia pneumática consiste na conversão de energia proveniente da compressão do ar em energia mecânica. Efetivamente, as aplicações cujos requisitos podem ser assegurados por esta tecnologia apresentam em alguns aspetos capacidades inferiores comparativamente com as outras soluções como, por exemplo a capacidade de carga dada a baixa rigidez de um atuador. Na verdade, a pneumática é interessante para, por exemplo, ensaios de fluência, pois estes são praticamente estáticos e realizados em controlo de força, o que está consistente com uma fonte energética de pressão, como é naturalmente a energia pneumática. Esta particularidade possibilita, potencialmente, a construção de um mecanismo mais em conta relativamente à óleo-hidráulica ou à eletromecânica. No entanto, apesar dos componentes utilizados não apresentarem custos elevados, a compressão do fluido de trabalho é um processo dispendioso e exige alguma manutenção na rede de tubagens. Caso estas sejam produzidas em ferro, a presença de gotículas de água tende a oxidar o material, contaminando o ar [7].

A tecnologia óleo-hidráulica, por sua vez, converte energia proveniente de um fluido incompressível, o óleo, em energia mecânica com o intuito de gerar movimento linear ou rotativo. Como o fluido de trabalho é teoricamente incompressível, esta tecnologia consegue permanecer em força constante sem que a bomba necessite estar continuamente a fornecer caudal ao circuito. Por outro lado, a óleo-hidráulica tem bom desempenho em aplicações dinâmicas com cargas elevadas. Porém, também podem ser destacadas algumas desvantagens, como a possibilidade de fugas do fluido de trabalho e a necessidade de muitos componentes para o seu correto funcionamento, como reservatório, filtros, bombas, motores, válvulas e a geração local da energia, entre outros.

Por outro lado, a tecnologia eletromecânica, tal como o nome assim o refere, converte energia elétrica em energia mecânica. Os sistemas eletromecânicos continuam a ser uma aposta crescente no mundo industrial. A grande vantagem destes sistemas assenta na sua facilidade em termos construtivos, na medida em que estes já apresentam soluções de acionamento muito completas e padronizadas. Por vezes, a dificuldade na utilização destas tecnologias encontra-se na parametrização necessária para o controlo. Em termos de capacidade de carga, a tecnologia óleo-hidráulica consegue utilizar componentes com dimensões inferiores. Mais uma vez, é fundamental conhecer os requisitos funcionais do mecanismo, visto que os sistemas eletromecânicos não devem ser selecionados para utilizações que requeiram movimentos muito lentos. Caso nenhum requisito técnico limite a utilização de uma qualquer tecnologia, então o custo pode ser uma condição decisiva. Pelo facto de a tecnologia óleo-hidráulica depender da energia elétrica, em termos de consumo energético, esta revela-se mais cara. Por outro lado, como ainda se tem que criar uma outra energia, essa conversão tem custos que não são negligenciáveis. No cômputo geral, se não houver motivos para excluir nenhuma hipótese, a solução eletromecânica tende a ser a de menor custo de investimento e de exploração. No entanto, as máquinas de ensaio caracterizam-se pelo seu nível de exigência elevado, pelo que o tema “manutenção” não pode ser ignorado. A manutenção de um equipamento pode ser um procedimento dispendioso e, nessas situações, as soluções hidráulicas podem revelar-se mais vantajosas.

Um fator positivo e importante, é a capacidade de controlo em malha fechada dos circuitos eletromecânicos contrariamente ao que acontece com os circuitos óleo-hidráulicos

convencionais. Desta forma, a tecnologia hidráulica convencional é utilizada para aplicações que não exijam um posicionamento preciso de um atuador. Nessas situações, o controlo, feito em malha aberta, precisa da sensibilidade do utilizador para decidir a posição, a velocidade e a força aceitáveis para a aplicação em causa. Através do ajuste da válvula limitadora de pressão, é feito o controlo da pressão do circuito. Adicionalmente, a repetibilidade do comportamento dos circuitos hidráulicos é extremamente influenciada pela manutenção dos componentes constituintes devido a desajuste dos mesmos e a eventuais fugas que possam surgir. Por outro lado, a viscosidade do óleo não é constante, devido às alterações de temperatura do fluido, pelo que nem a repetibilidade em diferentes momentos é devidamente assegurada [8].

Este cenário é particularmente alterado quando se consideram soluções com servo sistemas hidráulicos, portanto sistemas hidráulicos de funcionamento progressivo, em malha fechada.

Na figura 2.1 são tipificadas as curvas limite de cada tecnologia de acordo com a potência requerida no acionamento em função da resposta dinâmica [9].

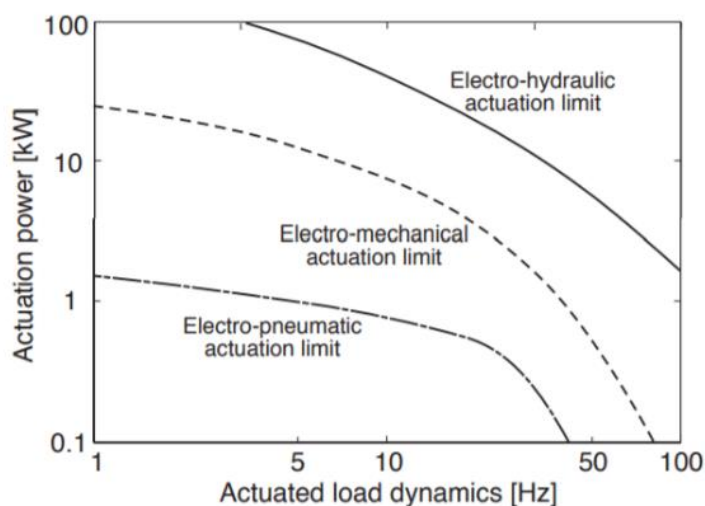


Figura 2.1 - Curvas limites de potência das tecnologias eletro-hidráulica, eletromecânica e eletropneumática para acionamento em função da resposta dinâmica [9].

Como pode ser observado, a tecnologia eletro-hidráulica pode ser utilizada quer para aplicações que requeiram elevadas potências quer para elevadas dinâmicas de atuação. Geralmente, aplicações com requisitos de elevado desempenho estão associadas a frequências de resposta de largura de banda amplas, de elevada rigidez de comportamento e de elevada precisão.

Para baixas gamas de potência e de resposta dinâmica, os sistemas electropneumáticos e eletromecânicos apresentam certamente custos inferiores. Apesar disso, é importante ter em atenção que o custo final de um equipamento é sempre bastante dependente da potência que é necessária utilizar na aplicação [9].

Tendo em conta todos os pontos de vista aqui demonstrados, como primeira impressão, um dispositivo de solução eletro-hidráulica não aparenta ser a solução mais adequada para uma máquina genérica de ensaio modular e flexível, quando comparado com a tecnologia eletromecânica.

Contudo, os sistemas hidráulicos não só abrangem uma maior gama de capacidade de carga, utilizando componentes com menores dimensões como, apesar de estarem sujeitos às variações de viscosidade do óleo em função da temperatura, de eventuais desajustes e de possíveis fugas do fluido, a sua crescente interligação com sistemas eletrónicos de comando programáveis já

se apresenta numa fase interessante para lidar com tais problemas. Por fim, tanto um funcionamento dinâmico como um funcionamento estático são, também, assegurados por esta tecnologia.

As tecnologias enunciadas até este ponto estão, no entanto, em constante evolução. Apesar das vantagens e desvantagens que foram descritas, os avanços em cada uma destas tecnologias vai colmatando alguns dos seus pontos negativos e sublinhando os pontos fortes de cada uma. Por este motivo, vão sempre surgindo novos métodos para se converter energia elétrica, hidráulica ou pneumática em energia mecânica de modo controlado.

Como exemplo particularmente interessante desta evolução podem-se destacar os motores elétricos lineares que, tal como o nome refere, conseguem converter diretamente a energia elétrica em movimento mecânico linear, sem fazer uso de um fuso, ou outra solução de conversão mecânica. Ao contrário dos motores elétricos tradicionais, os motores lineares apresentam o rotor e o estator dispostos e alinhados, como se pode observar na figura 2.2, mas o princípio de funcionamento é mantido. As bobinas, alojadas no estator, funcionam como eletroímãs que, quando energizadas, criam um campo magnético induzido, com polaridade oposta, nos ímãs permanentes do rotor. A energização alternada dessas bobinas faz com que, rapidamente, o rotor encontre uma polarização semelhante e seja repulso, iniciando, assim, o movimento linear. Este motor, de acordo com o seu tamanho e, consequentemente, número de bobinas, tem capacidade para movimentar mais do que um rotor, de forma totalmente independente. Por outro lado, como não é estabelecido contacto mecânico entre o rotor e o estator, não existem forças de atrito o que, de certa forma, aumenta a capacidade dinâmica do sistema, alcançando valores de velocidade particularmente elevados. Por fim, podem ser inseridos transdutores no estator do motor, simplificando todo o sistema construtivamente [10].

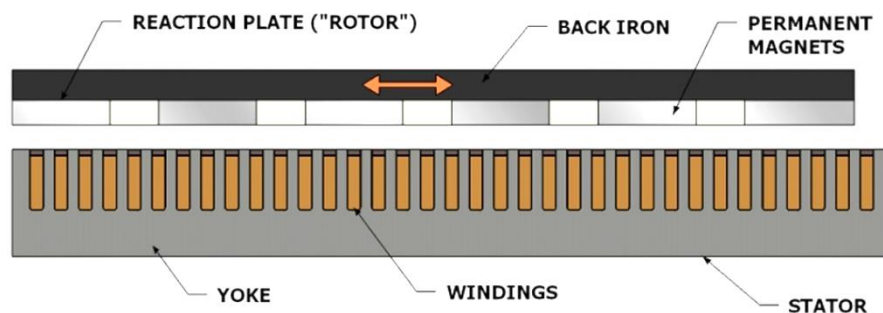


Figura 2.2 - Representação da estrutura de um motor elétrico linear [10].

2.5 Sistemas servo-hidráulicos

Ainda no âmbito das evoluções das tecnologias, referidas no tópico anterior, outro exemplo são os sistemas servo-hidráulicos. Estes sistemas resultam de uma evolução dos sistemas óleo-hidráulicos convencionais e da necessidade crescente de controlo de movimentos em malha fechada. A facilidade com que se consegue aplicar este controlo está associada aos desenvolvimentos de válvulas proporcionais e de servo válvulas. Estes dois tipos de válvulas de comando elétrico progressivo possibilitam que seja feito o controlo de posição da sua gaveta, variando, assim, o caudal que é fornecido a um atuador e, consequentemente, a velocidade do mesmo.

Focando o assunto para a tecnologia servo-hidráulica, a adição de transdutores permite que o sistema tenha *feedback* do comportamento do atuador, reajustando o sinal que é dado à válvula para que, no final, se obtenham os valores de velocidade, de posição ou de força pretendidos.

Desta forma, obtém-se um circuito controlado em malha fechada. Como os sistemas hidráulicos e servo-hidráulicos são regidos pela fórmula elementar $F=p \cdot A$, quando aplicadas elevadas pressões sobre superfícies eventualmente de dimensão reduzida, atingem-se grandes capacidades de força apesar das pequenas dimensões dos atuadores, contrariamente ao que acontece nos sistemas eletromecânicos [8].

A normal e comum utilização de sistemas servo-hidráulicos, atualmente, não reflete a sua aplicação no passado. No início, apenas as aplicações com elevados requisitos de desempenho recorriam a uma solução com recurso a um servomecanismo, isto é, com controlo de movimento realizado em malha fechada. Contudo, apesar de ainda hoje servo sistemas serem muito apetecíveis nas aplicações de grande desempenho, a sua presença começa a ser normalizada e utilizada numa grande variedade de aplicações, como na indústria automóvel. O investimento no controlo em malha fechada garantiu às empresas operações mais rápidas, mais precisas e de mais fácil ajuste.

O comportamento de um servomecanismo servo-hidráulico pode, então, ser caracterizado por [9, 11]:

- Rápida resposta nas mudanças de velocidade e de sentido de movimento;
- Baixa taxa de desgaste;
- Ausência de folgas;
- Controlo fácil e preciso da posição e da velocidade dos movimentos;
- Boas características de rigidez;
- Cursos reduzidos;
- Capacidade de suporte de cargas elevadas;
- Atuação direta sobre uma carga (*direct drive*).

Na verdade, as capacidades da tecnologia servo-hidráulica em muito se assemelham às capacidades de um sistema eletromecânico, mas com recurso a mais componentes. O comando e monitorização de um sistema de movimentação elétrico através de um servomotor e de um *drive* de servomotor, por si só, já garante níveis de precisão e de repetibilidade muito superiores comparativamente com as soluções de hidráulica convencional. A par destas capacidades, está então a tecnologia servo-hidráulica que também assegura um controlo preciso em posição, em velocidade e nomeadamente em força. Todavia, apenas com a utilização de um controlador de uma servo válvula, ou de uma válvula direcional proporcional de elevado desempenho, e de transdutores, para que o sistema tenha *feedback* das variáveis que está a controlar, é que se consegue alcançar um nível semelhante ao dos sistemas eletromecânicos. Contudo, os sistemas óleo-hidráulicos não podem deixar de conter outros elementos como filtros, reservatório de fluído, as tubagens e outros elementos que são indispensáveis num circuito hidráulico. A presença destes componentes é fundamental para assegurar o objetivo final de controlo de pressão e de caudal do circuito, da mesma forma que o *drive* controla a corrente que é fornecida ao servomotor. Como consequência destas necessidades por parte da tecnologia servo-hidráulica, todo o sistema se torna mais complexo, ocupa maior área e pode ser mais dispendioso [8].

No entanto, é de sublinhar que um acionamento hidráulico permite uma performance mais estável a baixas velocidades e inclui, geralmente, uma gama de velocidades mais alargada sem recorrer a circuitos de controlo especiais, manifestando, também, uma capacidade de auto arrefecimento superior. Pelo contrário, um acionamento elétrico apresenta maior dificuldade de funcionamento a velocidades muito reduzidas tendo tendência para o sobreaquecimento.

Na figura 2.3 são apresentadas algumas áreas que recorrem a sistemas servo-hidráulicos.

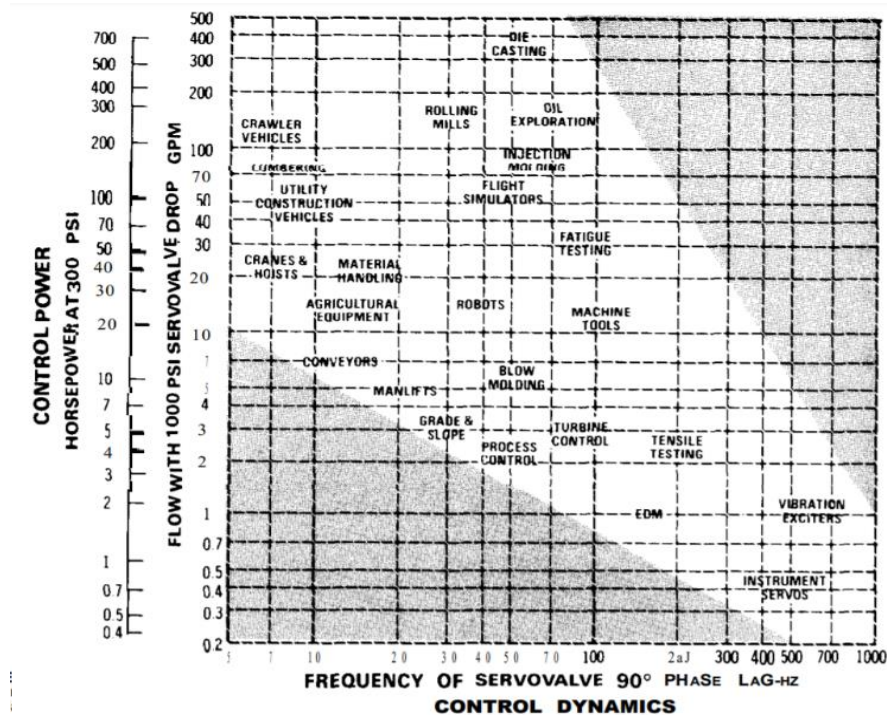


Figura 2.3 – Aplicações assinaladas por zonas definidas por potência em função da resposta dinâmica, que utilizam tecnologia servo-hidráulica [11].

2.6 Válvulas hidráulicas proporcionais

A tecnologia hidráulica convencional, por apenas permitir o controlo da pressão e do caudal por ajustes manuais, como acontece nas válvulas limitadoras de pressão ou nas válvulas de regulação de caudal, não permite que um sistema garanta uma adequada progressão no arranque ou na paragem de um movimento. Esta mudança, quase que instantânea do estado parado para o estado de movimento a velocidade constante e vice-versa, provoca nos componentes, acelerações/desacelerações bruscas que acarretam elevados esforços mecânicos. A continua exposição destes componentes a esses esforços gera potencialmente fadiga, reduzindo a vida útil dos elementos. Por outro lado, as aplicações que precisem de variar a pressão e o caudal ao longo da sua atividade ou que necessitem de controlo de posição não são bem conseguidas por soluções suportadas pela óleo-hidráulica convencional.

As válvulas hidráulicas proporcionais ao permitirem o controlo contínuo e progressivo da sua característica funcional, em função da corrente elétrica enviada diretamente para os seus solenoides, possibilitam uma mudança de estado dinâmico-estático mais progressiva. Os solenoides destas válvulas são energizados permanentemente, oscilando entre a corrente mínima e a corrente máxima, atuando no órgão de comando da válvula consoante a intensidade de corrente que recebem. Porém, em situações mais delicadas, estas válvulas não devem ser utilizadas, uma vez que ainda apresentam valores consideráveis de histerese e de zona morta.

A histerese caracteriza-se pela diferença sentida, por exemplo, no posicionamento da gaveta da válvula, nas proximidades da posição desejada, quando o sinal de comando é crescente ou decrescente. Nas válvulas hidráulicas proporcionais, a histerese é causada pela excitação eletromagnética do solenoide, mas também pela fricção da gaveta no corpo da válvula, por exemplo.

Um método para corrigir a histerese passa por aplicar um sinal *Dither* ao sinal de comando da válvula. O *Dither* trata-se de um sinal de elevada frequência (na ordem de 100 a 200 Hz) e de baixa amplitude, originando uma contínua oscilação mecânica do solenoide. Desta forma, tanto se reduz o atrito entre partes com movimento relativo como se evita o depósito de partículas microscópicas resultantes da contaminação do óleo. Porém, a utilização de controlo de um sistema em malha fechada tem maior impacto na correção da histerese, tal como pode ser visto na figura 2.4, onde o *feedback* que o sistema recebe do seu comportamento ajuda a corrigir o mesmo [12].

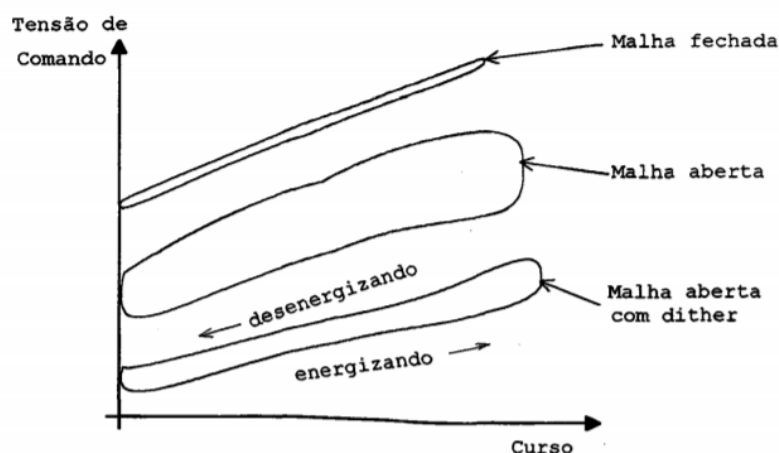


Figura 2.4 - Curvas de histerese com e sem controlo de posição e com *Dither* [11].

A maioria das válvulas proporcionais possuem recobrimento positivo. Esta característica permite que, com a gaveta na posição central, sejam reduzidas as fugas e a possibilidade de o atuador continuar a mover-se, ainda que lentamente. Por outro lado, permite, também, aumentar as tolerâncias dimensionais das válvulas e, conseqüentemente, reduzir o seu custo final. Contudo, este tipo de recobrimento obriga à existência de uma zona morta funcional que é indesejável. Esta zona morta traduz a gama inicial de corrente de comando que percorre um solenoide e que ainda não produz um movimento na válvula ao qual corresponda uma variação do fluxo que a atravessa.

Com a utilização de um amplificador eletrónico no comando da válvula, é possível fazer uma compensação da zona morta, eliminando praticamente toda a sua influência na aplicação. Assim, para um sinal de entrada de 1-2% do seu valor máximo, o sinal de saída do amplificador aumenta, repentinamente, de acordo com o ajuste de zona morta estabelecido. Assim, os primeiros 2% de sinal de entrada são utilizados para colocar a gaveta da válvula no extremo da zona morta. Desta forma, para sinais acima de 2%, a válvula deixará passar caudal.

Atualmente, porque o grau de desenvolvimento dos amplificadores eletrónicos assim o permite, as válvulas proporcionais passaram a incluir um novo ramo ou uma nova subfamília, designada por válvulas proporcionais de elevado desempenho. Fundamentalmente, este tipo de válvulas cobre uma área de aplicações que requerem:

- Tempos de resposta muito curtos;
- Baixa histerese;
- Recobrimento nulo ou negativo;
- Alto ganho de pressão.

As válvulas de elevado desempenho, pelo facto de terem a gaveta a deslocar-se no interior de uma camisa fixa ao seu corpo, revelam uma redução significativa do atrito entre as partes com movimento relativo. Por este motivo, a histerese é praticamente nula, não existe zona morta e,

portanto, o controlo de posição da gaveta da válvula é mais rigoroso. Desta forma, consegue-se um alinhamento perfeito entre as arestas da gaveta e os orifícios de passagem, possibilitando o uso de gavetas com recobrimento nulo (crítico) ou negativo.

Por outro lado, estas válvulas apresentam 4 posições funcionais limite, sendo uma delas apenas utilizada quando o eletroímã é desativado, apelidada, por isso, de posição de repouso (ou de segurança). Nestas válvulas existe somente um eletroímã para comando do movimento do atuador hidráulico em ambos os sentidos. Para que o movimento do atuador seja de velocidade “zero” o eletroímã deve ser comandado em volta da sua posição média de funcionamento. Para o movimento ser de avanço ou de recuo o comando do solenoide deve ser superior ou inferior a esse valor médio, sem nunca descer abaixo de um valor mínimo que conduza à designada posição de repouso, ou de segurança.

Optar por este tipo de válvulas para máquinas de ensaio tem-se revelado uma escolha mais económica e que garante bons níveis de desempenho no controlo dos movimentos, quando comparada com a aplicação de servo válvulas. Estas, por sua vez, apresentam um custo bastante superior e a sua tolerância a eventual contaminação com partículas sólidas no fluido é muito baixa [13].

Por fim, o controlo e a qualidade do movimento é ainda influenciado pelo comando das válvulas, que é feito com ajuda de amplificadores eletrónicos. O comando direto da corrente da bobina, embora possível, é um procedimento a evitar, apesar de ser o mais simples. Este método recorre a uma fonte de corrente contínua e a um potenciómetro, cujo ajuste irá determinar a diferença de potencial da bobina e, consequentemente, a corrente que a atravessa. Esta simplicidade do circuito acarreta algumas desvantagens. De facto, o calor gerado no potenciómetro é proporcional à queda de tensão multiplicada pela corrente que o atravessa, e apenas uma resistência de grandes dimensões conseguiria dissipar todo o calor produzido. À medida que a corrente circula na bobina, a temperatura desta e do potenciómetro têm tendência para aumentar, o que acaba por reduzir essa corrente. Por este motivo, o ajuste da válvula pode desviar-se do ajuste feito ao potenciómetro. Este tipo de comandos é, sobretudo, recomendado para aplicações que apenas funcionem durante curtos espaços de tempos e que não necessitem de um controlo preciso de velocidade.

O uso de amplificadores eletrónicos no comando do eletroímã torna possível a integração das válvulas proporcionais em sistemas totalmente automáticos controlados em malha aberta ou em malha fechada. Para válvulas proporcionais sem realimentação a utilização de amplificadores incorporados em ficha são adequados. Contudo, para aplicações que necessitem de um controlo mais eficiente ou para válvulas com realimentação, a melhor opção são os amplificadores eletrónicos integrados na própria válvula. Estes amplificadores podem ser aplicados a qualquer válvula situados numa caixa em cima desta e com as ligações aos eletroímãs já estabelecidas. Contudo, após a integração deste tipo de amplificadores, não é possível desintegrá-lo e colocá-lo sobre outra válvula. Estas características, apesar de não permitirem o aproveitamento do amplificador para outras válvulas, assegura o ajuste mais adequado de ganho, zona morta e do *dither* para a situação em causa, dado que provêm de fábrica. Desta forma, eventuais ocorrências de erros é reduzida. Pelo facto de esta solução requerer menos necessidade de ajuste, as válvulas não precisam de ser colocadas em zonas de fácil acesso. Por outro lado, todo o processo de instalação e especificação está simplificado, uma vez que as ligações entre amplificador e válvula já estão efetuadas[12, 13].

2.7 Máquinas de Ensaio de Referência

Para uma melhor compreensão e apreciação do impacto positivo alcançado com a introdução dos conceitos abordados no subcapítulo 2.2, e de componentes de última geração na elaboração de sistemas de ensaio flexíveis, é fundamental começar por analisar as máquinas de ensaio de solução tradicional e que neste contexto se podem apelidar por “Máquinas de Ensaio de Referência”.

As máquinas de ensaio de referência para este projeto remetem para uma altura cujas preocupações, tanto ao nível de construção como de *software*, evidenciavam diferenças significativas relativamente às perspetivas atuais. Ou seja, todo o desenvolvimento da máquina era centrado na qualidade da mesma para a execução de um ensaio, havendo menor preocupação perante conceitos como versatilidade, flexibilidade, modularidade e reconfiguração. Mediante o exposto, uma máquina de ensaios tradicional é um mecanismo servo-hidráulico com uma estrutura rígida, pensada essencialmente para uma função de ensaio específica.

Desta forma, a unidade energética, dimensionada para a capacidade limite de funcionamento, está rigidamente acoplada à máquina não sendo, portanto, dissociável dela. Geralmente estas unidades energéticas não permitem o ajuste de caudal nem de cilindrada e trabalham sempre a uma pressão constante, que é a máxima. Os atuadores também são de características funcionais fixas e projetados para a aplicação que se pretende executar, pelo que o seu curso, capacidade de carga e de dinâmica são parâmetros pré-definidos na conceção. Por fim, o *software* acaba por ter a vantagem de ser mais fácil de programar e de compreensão mais simples, uma vez que é focado apenas numa aplicação em causa diminuindo os requisitos do mesmo. Por outro lado, estas máquinas tradicionais pressupõem um controlo centralizado, em vez de distribuído recorrendo-se, sobretudo, à cablagem o que pode resultar em quadros elétricos mais densos e de difícil manuseamento [14]. A comunicação à distância é, em geral, inexistente.

Na constituição base das máquinas de ensaio tradicionais fazem parte:

- Uma fonte de energia hidráulica,
- Elementos de controlo e monitorização, como válvulas e sensores,
- Elementos de atuação, como cilindros e motores, e
- Outros componentes como, por exemplo, outros dispositivos complementares de medição.

Porém, todos estes componentes são pré-definidos. Tal como foi visto anteriormente, o termo servomecanismo representa o comando de um sistema com capacidade para medir as grandezas que se pretendem controlar e atuar de forma a acompanhar o sinal de comando de forma rápida e rigorosa. Desta forma, perturbações externas e anomalias do sistema de controlo ou da carga podem ser facilmente corrigidas ou eliminadas. De forma simplificada a figura 2.5 representa o funcionamento base de um servomecanismo que pode ser aplicado a este caso.

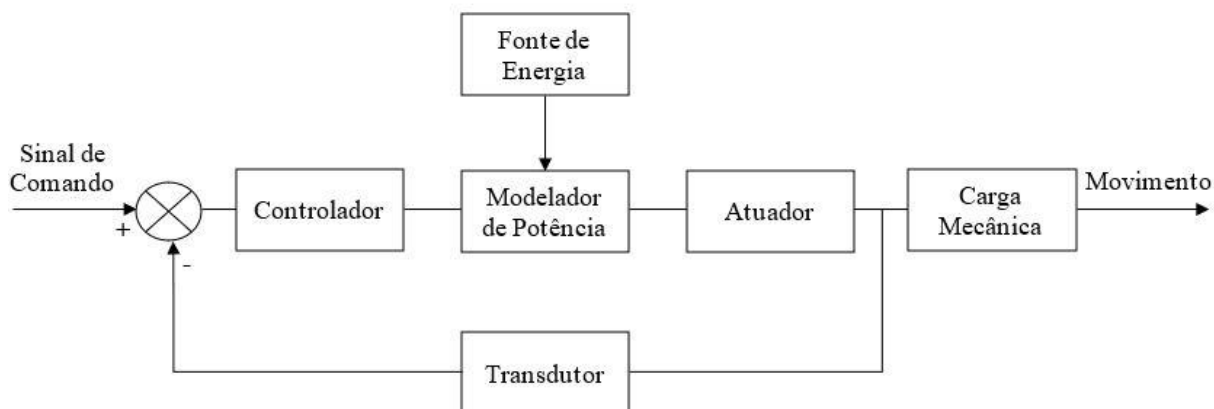


Figura 2.5 - Esquema base de um servomecanismo.

Outro conceito que, muitas vezes, não é tido em consideração nestas máquinas de ensaio tradicionais é a eficiência energética das mesmas. Na realidade, a energia gasta durante o funcionamento não era, tradicionalmente, um tópico importante nem crítico para a indústria, nem para o meio ambiente, quando comparado com os objetivos funcionais das mesmas. Contudo, com o passar dos anos, também esta mentalidade se foi adaptando. Atualmente, para além dos objetivos impostos pela União Europeia relativos à redução de consumos energéticos e melhoria da eficiência energética, essas metas representam sobretudo uma redução nas despesas das empresas. De notar que a eficiência de uma máquina dependerá sempre da configuração da mesma o que, por sua vez, se subordina ao nível de potência de que se pretende dispor e ao número de eixos que se pretendem controlar.

Apesar de todas estas variantes, pode-se afirmar que para uma máquina de ensaios ser mais eficiente, o controlo de movimento e, portanto, do caudal a ser fornecido a um atuador deve ser feito pela adequada disponibilização de caudal para o objetivo do movimento, em cada momento, e não pela libertação daquele que se encontra em excesso à pressão máxima, como tradicionalmente é feito em máquinas de referência. Nesse sentido, o controlo do caudal conseguido por comando sobre o caudal gerado por uma bomba é muito mais eficiente do que feito exclusivamente através da utilização de uma servo válvula, como acontece numa máquina tradicional. As perdas energéticas que são introduzidas por estas válvulas no sistema são muito importantes e podem ser demonstradas pelas próprias especificações das mesmas. Habitualmente, o caudal nominal de uma servo válvula é definido para uma queda de pressão global na válvula de 70 bar. Ora, se a pressão de alimentação for de 210 bar e a válvula funcionar sob condição nominal de funcionamento, apenas 67% da pressão disponível é utilizada para vencer a carga, sendo 33% perdida na servo válvula [9].

As máquinas tradicionais de ensaios apresentam, na sua conceção, uma válvula direcional proporcional de elevado desempenho e uma bomba de cilindrada fixa, pelo que o caudal que esta fornece não é ajustado em cada momento à necessidade específica de movimento de velocidade variável da máquina. A pressão máxima do sistema é definida pela válvula limitadora de pressão, que liberta o caudal excedentário que não é absorvido pelo sistema. Deste modo, todo o caudal excedente é enviado diretamente para o reservatório, com inevitável libertação substancial de energia para o fluído hidráulico, contribuindo para o seu aquecimento. Pode-se observar, deste princípio funcional, que a preocupação pela eficiência energética do sistema não é de todo acautelada. Nas imagens que se seguem faz-se uma caracterização teórica da eficiência do sistema tradicional com a solução aqui abordada [9].

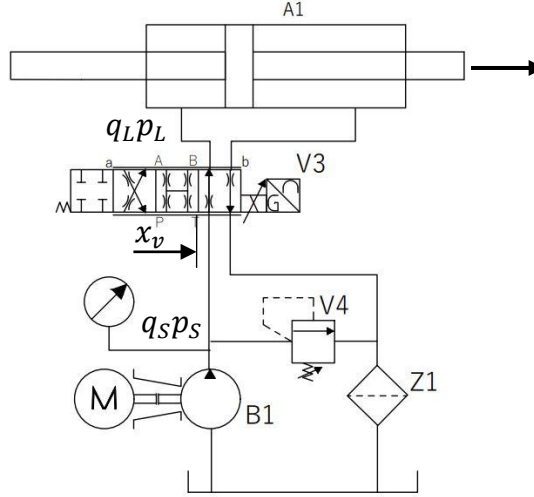


Figura 2.6 - Circuito hidráulico com bomba de cilindrada fixa.

O cálculo do rendimento pode ser dado por,

$$\eta_{sistema} = \frac{q_L p_L}{q_S p_S} \quad (2.1)$$

Sendo:

q_L – caudal admitido no atuador para mover a carga à velocidade desejada

p_L – queda de pressão no atuador necessária para vencer a carga

q_S – caudal fixo gerado pela bomba

p_S – pressão fixa à saída da bomba, definida pela válvula limitadora de pressão

Para uma válvula proporcional de elevado desempenho de quatro orifícios simétrica, comandando o movimento de um atuador também simétrico, o caudal que a atravessa, para uma abertura x_v quando o atuador é sujeito a uma carga p_L , é dado por,

$$q_L = C_d * \phi_v * x_v * \pi * \sqrt{\frac{p_S - p_L}{\rho}} \quad (2.2)$$

O caudal mínimo que é necessário ser garantido pela bomba, para uma abertura máxima da válvula $x_{vmáx}$ e para uma pressão de alimentação p_S e ausência de carga externa, é dado por,

$$q_S = C_d * \phi_v * x_{vmáx} * \pi * \sqrt{\frac{p_S}{\rho}} \quad (2.3)$$

A curva de rendimento do sistema é máxima quando $x_v = x_{vmáx}$, ou seja, quando a gaveta da válvula está à sua máxima abertura. Substituindo os caudais na equação 2.1 pelas expressões das equações 2.2 e 2.3 obtém-se

$$\eta_{sistema,máx} = \frac{\sqrt{p_S - p_L} * p_L}{\sqrt{p_S} p_S} \quad (2.4)$$

A equação que permite conhecer a pressão na carga, p_L , que origina a máxima eficiência do sistema é dada por

$$\frac{d(\eta_{sistema})}{d(p_L)} = 0 \Rightarrow p_L = \frac{2}{3} p_S \quad (2.5)$$

Analisando a figura 2.7, verifica-se que para esta relação entre a pressão de alimentação e a pressão da carga, apenas se alcança 38,5% de eficiência energética global máxima.

Este valor revela-se demasiado pequeno para um servo sistema atual. Todavia, este cálculo é feito para uma abertura máxima da gaveta da válvula direcional, ou seja, o sistema movimentar-se sob condição de comando máximo. Porém, em condições reais, o sistema não deve ser limitado a funcionar apenas às condições máximas. Desta forma, seria também interessante estudar o impacto no rendimento resultante de uma menor abertura da gaveta.

Ainda na figura 2.7 estão destacadas as curvas referentes a 50% e 33% de abertura máxima da gaveta. De notar, que se o valor do rendimento às condições máximas era reduzido, então, para situações mais normais, este ainda se revela bastante inferior.

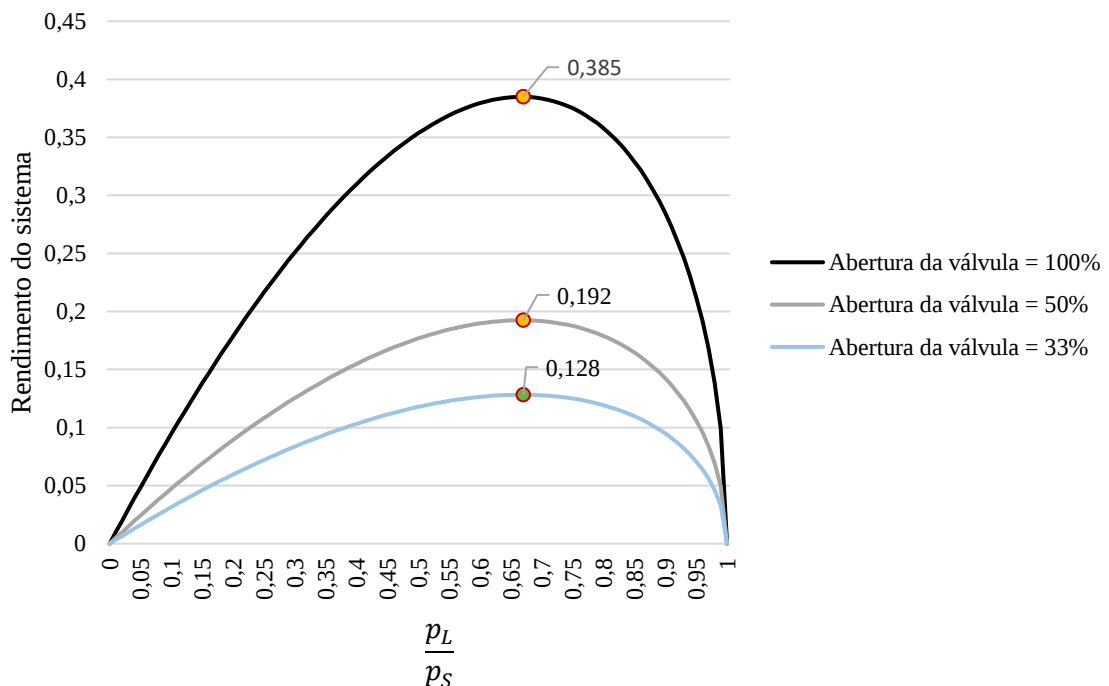


Figura 2.7 - Curva de eficiência energética em função da carga relativa.

Atualmente, dado que a eficiência energética é uma preocupação muito relevante na indústria é importante entender quais as soluções que podem ser aplicadas num mecanismo, de forma a diminuir o desperdício de energia. Os dois principais fatores que influenciam negativamente a eficiência de um sistema são:

- a queda de pressão excessiva nas válvulas, e
- o caudal enviado diretamente para o reservatório, sem produzir movimento.

O gráfico apresentado anteriormente, parte do pressuposto de que o caudal máximo que atravessa a válvula direcional, para a abertura máxima da gaveta, para uma carga nula no atuador e para uma pressão de alimentação na bomba igual à necessária para vencer a carga máxima, é exatamente igual ao caudal gerado pela bomba.

Segundo esta perspetiva, e para a curva de 100% de abertura da válvula, pode-se notar que o caudal é máximo quando a queda de pressão na válvula é igual à pressão da fonte resultando, por isso, numa pressão nula na carga. Por conseguinte, como pode ser observado, o rendimento do sistema para esta condição de funcionamento é de 0%.

De facto, não é interessante a aplicação de um circuito que apenas garanta o caudal máximo para uma condição de pressão na carga igual a zero, acarretando um rendimento do sistema nulo. Nesta situação, toda a energia do sistema é perdida na válvula e não no atuador. Uma solução para este problema passará, portanto, por desenvolver um circuito capaz de fazer o ajuste adequado da pressão na fonte para que o Δp na válvula seja o valor “desejado”, com o requisito de continuar a ser possível atravessar todo o caudal da fonte pela válvula direcional. Assim, desconstruindo a ideia base para a elaboração do gráfico da figura 2.7, se se optar por colocar no circuito hidráulico uma válvula que, para a sua abertura máxima da gaveta, o caudal que a atravessa é maior que o caudal gerado na bomba, nunca se chegará à situação de caudal máximo para abertura máxima. Portanto, todo o caudal fornecido ao circuito conseguirá atravessar a válvula, mas para uma queda de pressão diferente da pressão máxima na fonte.

Por outro lado, como foi referido anteriormente, o caudal enviado diretamente para o reservatório também prejudica o rendimento do sistema e, consequentemente, a sua eficiência. Para melhorar a eficiência dever-se-á ter capacidade para ajustar continuamente e de modo adequado do caudal da fonte às necessidades da aplicação.

Uma das alternativas que possibilita esse ajuste passa por introduzir no sistema um motor elétrico associado a um variador de velocidade. Esta solução pode ser utilizada tanto em circuitos com bomba de cilindrada fixa como de cilindrada variável.

Assumindo que a bomba utilizada é de cilindrada fixa, uma vez que se trata de uma opção com menor custo, o controlo da velocidade do motor, através do variador, determinará a velocidade de rotação da bomba variando, assim, o caudal fornecido por esta ao circuito hidráulico. Apesar de ser uma possibilidade satisfatória para a maioria das aplicações esta, apesar de tudo, não é adequada para situações que exijam um funcionamento a muito baixa velocidade durante um longo período de tempo. De facto, abaixo de um certo valor de velocidade, a ventilação do motor pode não ser suficiente para arrefecer o mesmo, prejudicando o seu funcionamento. Perante este novo problema, muitas vezes é implementado um arrefecimento forçado do motor ou opta-se por libertar algum caudal da bomba por uma válvula de descarga. Esta segunda hipótese pretende manter um consumo de caudal, ainda que pequeno, suficiente para manter uma velocidade mínima do motor para que a ventoinha assegure o arrefecimento necessário.

Apesar de em aplicações que não requeiram, continuamente, baixas velocidades de rotação do motor, o emprego desta técnica se revele satisfatório e pouco dispendioso, existem utilizações que não podem ser solucionadas desta forma.

Por isso, um outro método que permite ajustar o caudal da fonte segundo as necessidades do circuito e que garante um melhor desempenho a baixas velocidades assenta na introdução de uma bomba de cilindrada variável e não de cilindrada fixa. Caso a bomba disponha de comando automático da cilindrada para manter uma pressão constante, este tipo de bombas regula a sua cilindrada de acordo com o débito solicitado pelo circuito, mantendo a pressão de trabalho num valor constante. Porém, apesar deste procedimento eliminar, teoricamente, o caudal desperdiçado, o continuo funcionamento do motor ainda não é solucionado. Por conseguinte, registam-se perdas elétricas e mecânicas não negligenciáveis. Adicionalmente, mesmo que o circuito não necessite de caudal, a potência consumida pela bomba nunca será nula, uma vez que a sua velocidade de rotação também não é ajustada e é necessário manter o valor da pressão no valor desejado. Para além do mais, atualmente a aquisição de uma bomba com cilindrada variável traduz-se num gasto superior face à compra de um variador de velocidade. Por estes motivos, esta solução é aplicada essencialmente em soluções que necessitem de trabalhar a baixa velocidade, durante um longo período de tempo.

De forma a criar uma noção do impacto que uma bomba de cilindrada variável provocaria no circuito, é importante analisar a figura 2.8.

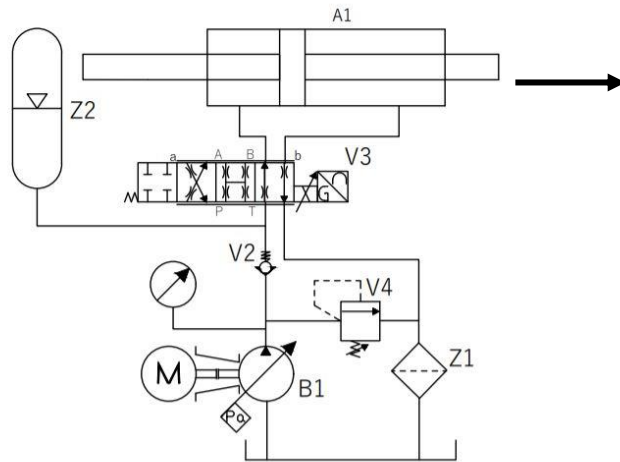


Figura 2.8 - Circuito hidráulico com bomba de cilindrada variável e acumulador [8].

A grande vantagem deste circuito é conseguir o ajuste do caudal fornecido pela bomba de acordo com as necessidades do sistema de um modo totalmente automático, sem necessidade de qualquer controlo pelo sistema de comando. Desta forma, numa situação ideal teremos a todo o momento que $q_s = q_L$, não havendo, portanto, qualquer excesso de fluído gerado pela bomba. Pode-se então concluir que o rendimento do sistema fica dependente apenas da relação entre a pressão de alimentação e a pressão na carga.

$$\eta_{sistema} = \frac{p_L}{p_S} \quad (2.6)$$

Considerando as características nominais, referidas em cima, para $\Delta p = 70$ bar e $p_S = 210$ bar, o $\eta_{sistema}$ passa a atingir um máximo de 66,7%, o que representa um aumento potencial de 73% no rendimento máximo do sistema. A presença do acumulador ajuda a manter a pressão constante principalmente quando a válvula direcional abre ou fecha rapidamente e a bomba não tem capacidade dinâmica para cumprir com esse requisito temporal.

Por fim, a instalação de uma bomba de caudal automaticamente ajustado em função da carga (“load sensing”) também é uma solução interessante para os problemas aqui em análise. Através deste método a cilindrada da bomba é permanentemente ajustada de modo que o caudal gerado seja o que é pedido pelo sistema e ainda a pressão à saída da bomba se mantenha num valor permanentemente superior à pressão na carga, com um diferencial de pressão constante. Para isso, é necessário existir uma pilotagem desde a linha de pressão na carga (load sensing), que é a pressão à saída da válvula direcional. Com esse valor de pilotagem como referência, a bomba tentará manter à entrada da válvula direcional um diferencial de pressão (Δp) acima da pressão na carga, ficando assim a válvula a impor esse Δp em cada passagem do fluído a um valor constante. Quanto menor for a queda de pressão definida maior será a otimização energética, mas certamente maior terá que ser a válvula utilizada para o mesmo caudal máximo desejado.

Deve-se ainda sublinhar que as máquinas de ensaio tradicionais efetuam um controlo, em malha fechada, quer de posição, quer de velocidade ou ainda de força. O controlo de velocidade reproduz-se pelo envio de um sinal elétrico de comando à válvula de elevado desempenho que,

por sua vez, traduz esse sinal num deslocamento da sua gaveta, determinando o caudal que é fornecido ao atuador. Conhecendo esse caudal e as dimensões do atuador, bem como a carga a que este está sujeito, é possível estimar numericamente a velocidade a que este se desloca. Por sua vez, no controlo de movimento é utilizada a leitura do sinal de *feedback* do transdutor de posição acoplado ao atuador. Quando este atinge a posição desejada, a válvula deslocar-se-á para a posição que mantenha o valor de posicionamento desejado, sob a carga a que o atuador estiver sujeito. Se a válvula utilizada for de centro critico e o atuador não estiver sujeito a qualquer carga externa, o atuador manterá a posição definida estando a válvula sobre a sua posição central.

O controlo de força é, sem dúvida, a forma de controlo mais difícil de implementar, nomeadamente se se pretender atingir grandes níveis de rigor. Este controlo depende sempre da existência de uma reação por parte do material sob ensaio e, por isso, dependerá das características desse material, nomeadamente a sua rigidez.

Neste sentido, para um material rígido o controlo de um perfil de força é feito a uma velocidade, teoricamente, nula. Nestas condições, a válvula de comando oscilará em torno da posição nula, onde deslocamentos da gaveta entre -2% e +2% do deslocamento máximo, permitem variações de -100% a +100% da força máxima exercida sobre a carga. Neste caso, a atuação “em força” é extremamente sensível ao comando da válvula.

Pelo contrário, se o material for muito pouco rígido, é possível que nunca se consiga atingir o valor de resistência desejado, ou que a velocidade do atuador tenha que ser demasiado grande para se conseguir cumprir um certo perfil desejado de variação de força. Nesta situação, este tipo de controlo é muito dependente da rigidez do material, que pode ser considerado, eventualmente, quase elástico, mas de rigidez baixa.

Outro aspeto também muito importante para o bom funcionamento de todo o mecanismo é a temperatura do óleo da central hidráulica, dado que esta apresenta uma relação inversa com a viscosidade do mesmo.

O aumento da viscosidade do fluído não só causa quedas de pressão adicionais nas próprias tubagens como dificulta a lubrificação das partes móveis dos componentes. Contudo, um fluído pouco viscoso também pode ser responsável por fugas acrescidas entre zonas de alta e baixa pressão. Deste modo, é importante estabilizar a temperatura do óleo numa gama ótima para que se consiga manter a gama de viscosidade pretendida para a aplicação e para os componentes constituintes de um sistema. As máquinas tradicionais contêm transdutores de temperatura na central hidráulica essencialmente para identificação de temperatura limite de funcionamento [15], o que pode não ser considerado adequado para máquinas de elevado rigor funcional.

Por último, mas não menos importante, a segurança da máquina não deve ser esquecida. Máquinas de ensaio de referência são máquinas que naturalmente foram concebidas antes da harmonização legislativa na ótica da segurança, saúde e sustentabilidade, pelo que normalmente não cumprem com os parâmetros de segurança essenciais para o seu correto e seguro funcionamento, de acordo com a legislação atual da União Europeia.

Hoje em dia, para que uma máquina possa ser comercializada não basta que esta apresente qualidade na execução das tarefas para as quais foi projetada, mas deve garantir, também, a segurança de quem a opera, a ajusta e a mantém, nomeadamente. No processo de projeto e construção do mecanismo, o fabricante deve identificar e avaliar os possíveis perigos, através de uma apreciação de riscos e atuar de forma a eliminá-los ou reduzi-los. Muitas vezes, as medidas passam por soluções de prevenção intrínseca. Caso não seja possível assegurar a

redução dos riscos através de medidas de conceção, deve-se apostar em meios de proteção adequados e, por último, informar os operadores sobre possíveis riscos. Assim, de forma a criar um mercado de livre circulação de mercadorias que prioriza a proteção dos cidadãos, a União Europeia aprovou várias diretivas com a finalidade de alcançar esse objetivo. Estas diretivas tanto se dirigem a fabricantes – Diretiva Máquinas (Diretiva 2006/42/CE) – como aos operadores – Diretiva que regulamenta a utilização dos equipamentos de trabalho (Diretiva 2001/45/CE) [16].

É obrigação do fabricante adotar uma perspetiva de segurança desde o início da conceção da máquina, para que possam ser aplicadas soluções construtivas, por si só suficientes para reduzir ou eliminar os riscos, ou que permitam a posterior inclusão de dispositivos de proteção como sensores, disjuntores, sinalizadores luminosos, entre outros. Deve ser redigido um manual de operação para acompanhar a máquina e um Dossier Técnico de Fabrico. Tal como o nome indica, o manual de operação ajuda o operador a melhor manusear e a operar a máquina, de acordo com os princípios pensados pelo fabricante. Por sua vez, o Dossier Técnico de Fabrico contém os elementos técnicos adequados para demonstrar a conformidade da máquina com os requisitos de segurança aplicáveis.

Por fim, para se poder iniciar o processo de comercialização do mecanismo, o fabricante poderá ter de efetuar um pedido de exame CE de tipo, junto de um organismo notificado, para avaliar se a máquina cumpre com as exigências descritas no Decreto-Lei nº. 103/2008 [16].

2.8 Do passado tradicional ao presente tecnológico

Presentemente, é notória a incapacidade e dificuldade que as máquinas de ensaio tradicionais têm na corrida à modernização e adaptação aos avanços tecnológicos. Alguns dos motivos foram referidos no subcapítulo anterior. Neste sentido, cada vez mais se tenta desenvolver, desde o início, um sistema que preencha os requisitos para uma dada aplicação, mas perspetivando, sempre, outras situações às quais possa ser exposto. De facto, a atualidade trouxe consigo um enorme número de possibilidades de componentes com capacidades que, até há alguns anos atrás, seriam impensáveis.

O empenho de grandes empresas ligadas aos dispositivos eletrónicos e à automação, como a *Schneider*, a *Siemens*, a *Omron*, entre outras, provocou, de tal forma, uma explosão de novas soluções tecnológicas de automação que, neste momento, pode-se considerar possível a construção de uma máquina com capacidades quase ilimitadas. Por isso, é importante reconhecer qual o verdadeiro impacto que adequadas alterações quer no *hardware* como no *software* podem significar.

A implementação num sistema de ensaio de dispositivos de última geração tem que garantir um visível aumento de qualidade no processamento de dados, na facilidade de obtenção dos mesmos, e permitir o controlo de diferentes variáveis em simultâneo e dar um relevo especial à facilidade de diálogo com o utilizador.

A introdução de componentes como, por exemplo, autómatos, variadores de velocidade, *soft starters*, componentes de segurança, vieram assegurar qualidade na execução das tarefas do sistema. Por outro lado, a redução de custos do material eletrónico também permitiu à indústria uma maior capacidade para aproveitar a relação custo/benefício da sua utilização.

De notar, também, que os próprios fornecedores passaram a ter uma redobrada preocupação com a documentação técnica de suporte necessária para a implementação dos dispositivos,

incluindo o *software*. Assim, o utilizador apenas tem que se adaptar e completar os documentos já fornecidos, de acordo com o programa que desenvolveu.

Pode-se, portanto, reconhecer que empresas do ramo eletrónico também assumiram o conceito de modularidade como ponto central à sua oferta de soluções. Contudo, esta nova realidade não é preenchida apenas por pontos positivos. Na verdade, a atividade de desenvolvimento informático passou a ter um papel substancialmente mais importante na flexibilidade dos sistemas e o custo da mesma passou a ter uma relevância muito mais significativa.

Cada vez mais se torna impraticável e indesejável desenvolver-se um *software* específico para cada aplicação, em primeiro lugar, porque as próprias máquinas já não desempenham apenas uma função e, em segundo lugar, porque o desenvolvimento individual de cada *software* resultaria num muito maior investimento em tempo de desenvolvimento.

2.9 Sistemas de ensaio flexíveis

Numa tentativa de melhorar e atualizar as máquinas tradicionais de ensaio, de modo a adaptá-las aos requisitos da atualidade, tem que ser reconhecida a pertinência dos sistemas flexíveis de ensaio. Estes sistemas têm como objetivo implementar os conceitos de modularidade, flexibilidade e reconfiguração, assim como apostar numa melhoria da eficiência energética e capacidade para realizar o controlo segundo diferentes configurações, apenas com uma arquitetura de *software*.

O interesse pela conceção de máquinas para desempenharem uma função específica é cada vez mais diminuto para a indústria. Estas soluções podem mesmo revelar-se mais caras do que sistemas flexíveis e acabam por exigir mais espaço de trabalho para fazerem as mesmas funções.

Com os avanços tecnológicos sentidos, as máquinas estão cada vez mais inteligentes e autónomas. Não só o desenvolvimento da programação permitiu alcançar patamares de controlo, comunicação e simplicidade de utilização que jamais se pensaria possível, como os componentes elétricos também acompanharam esse avanço.

Desta forma, a ideia de um sistema de ensaios flexível assenta numa perspetiva de se atingir a versatilidade. Assim, estes sistemas conseguem desempenhar várias funções – ensaio de tração, compressão, flexão, fluência, entre outros – com uma configuração sempre adaptável às necessidades de cada aplicação.

Relativamente à unidade energética, esta deixou de estar acoplada rigidamente à máquina e passou a cumprir os mesmos requisitos de flexibilidade e modularidade adequados às necessidades da aplicação, nomeadamente ser eventualmente dotada de potência continuamente ajustável. Por este motivo, consegue-se facilmente associar uma unidade energética única a mais que um sistema e, um mesmo sistema poder utilizar diversas unidades energéticas com diferentes características ou até complementares, conforme as suas necessidades funcionais. Neste caso, o número de eixos de atuação também não é necessariamente fixo e único, assim como a ligação destes ao controlador.

A intermutabilidade de atuadores também deve passar a ser simples, de modo a permitir que as características de atuação possam adaptar-se aos requisitos de ensaio. Por fim, o *software*, dado que deve abranger todas as possibilidades de ensaios, configurações físicas da máquina e comandos de força, deslocamento e velocidade, acaba por ser muito mais complexo e difícil de

gerir. Contudo, torna-se na ferramenta mais poderosa do sistema dada a capacidade de se moldar aos requisitos impostos e de fazer o tratamento dos dados [14].

2.10 Exemplo de um sistema de ensaio flexível

Neste subcapítulo será apresentado um exemplo real de um sistema de ensaios que já iniciou a maratona da tecnologia e que serve de referência de base para o desenvolvimento realizado no presente projeto. Por isso, já são visíveis alguns pontos que denunciam alguma flexibilidade quer em termos de *hardware*, quer em termos de *software*.

Esta afirmação é comprovada pela capacidade que este sistema apresenta para controlar desde um até quatro eixos e fazer medições de grandezas associadas ao sistema de ensaios quer sejam de força, de deslocamento, de pressão ou aceleração de cada um dos eixos, bem como ainda da temperatura do óleo da central hidráulica. Por outro lado, este consegue ainda adaptar-se ao comando de centrais hidráulicas com características diferentes para diferentes tipos de aplicações.

2.10.1 Caracterização estrutural

Este servo sistema hidráulico de ensaios apresenta a constituição base indicada no ponto 2.7, ou seja, contém:

- Grupo hidráulico;
- Servo atuador;
- Estrutura mecânica para suportar o atuador;
- Sistema de comando e aquisição de dados;
- Unidade complementar para instrumentação.

O que caracteriza a flexibilidade desta arquitetura de construção é que as partes constituintes mencionadas podem ser substituídas por outras de características distintas, mas assegurando-se compatibilidade funcional do conjunto completo.

O conceito de eixo diversas vezes apresentado ao longo deste documento refere-se ao servo atuador e inclui o cilindro hidráulico, neste caso de duplo efeito simétrico, ou não, a válvula direcional proporcional de elevado desempenho, os transdutores de posição e de força associados ao atuador, e ainda uma capacidade para medição de sinais de transdutores externos amplificados, por ficha normalizada, e por uma caixa de eixo responsável pela concentração de sinais dos transdutores a ela associados. Esta arquitetura de construção é observada na figura 2.9. A tabela 2.1 indica os componentes apresentados nessa figura.

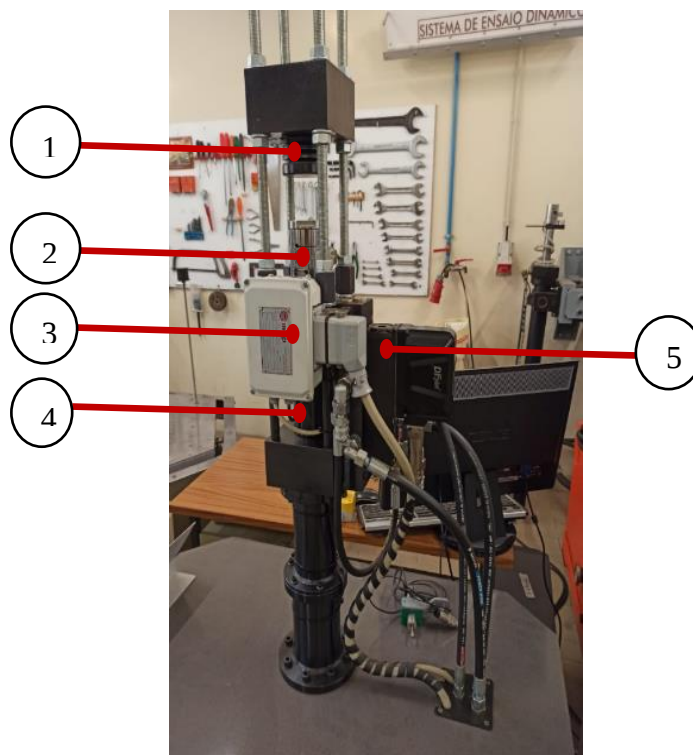


Figura 2.9 - Constituição física de um eixo hidráulico servo

Tabela 2.1 - Componentes que constituem o eixo.

Número	Componentes
1	Dispositivo de carga elástica para atuador
2	Célula de carga
3	Caixa concentradora do eixo
4	Atuador hidráulico
5	Válvula de Elevado Desempenho

2.10.2 Caracterização elétrica

Neste exemplo de sistema de ensaio pode-se destacar a presença de três quadros elétricos dotados de ligações flexíveis e normalizadas entre eles.

- o primeiro engloba toda a capacidade de controlo, de comando e de monitorização do sistema,
- o segundo diz respeito à alimentação em energia da unidade hidráulica que alimenta todo o sistema, e
- o terceiro que reúne todos os sinais e comandos associados a cada eixo, nomeadamente atuadores e transdutores, que o utilizador pretenda acrescentar até ao limite de quatro eixos.

Contudo, é sempre possível fazer adição de mais unidades, como será descrito a seguir.

Por outro lado, a modularidade do sistema é também apoiada pelas ligações que os eixos (servo atuadores) e a central hidráulica apresentam com o quadro de interface. Essas ligações são feitas por fichas fêmea-macho o que acaba por facilitar a troca de configurações/requisitos para uma determinada aplicação. De salientar ainda que o controlo é feito por um computador incorporado por cartas para a “leitura” e a “escrita” de sinais elétricos de comando.

De forma mais detalhada, este sistema de ensaio, eletricamente, é constituído pelos seguintes quadros elétricos:

- quadro Q1 - quadro elétrico de interface (QEI) que concentra todos os elementos responsáveis por receber e distribuir os comandos provenientes do PC,
- quadro Q2 - quadro elétrico da unidade hidráulica (QEUH), que fornece ao quadro Q1 a alimentação elétrica, e recebe deste os sinais para comandar todos os elementos constituintes da unidade hidráulica,
- quadros Q3 – quadros relativos a cada um dos eixos. São nada mais que caixas concentradoras das ligações específicas a cada eixo, nomeadamente a transdutores e válvulas.

A necessidade de flexibilidade faz com que a conexão estabelecida entre o QEI e os eixos seja feita por duas fichas:

- Ficha de 7 pinos – responsável pela alimentação e comando da válvula de elevado desempenho (ficha normalizada);
- Ficha de 24 pinos – responsável pela alimentação e leitura dos transdutores associados a cada eixo.

Por sua vez, a conexão com a unidade energética é feita, também, com duas fichas:

- Ficha de 4 pinos – responsável pela alimentação elétrica de potência do quadro de interface;
- Ficha de 16 pinos – responsável pelos comandos digitais a válvulas e comando de motor elétrico, e leituras digitais de detetores, como por exemplo do filtro hidráulico, e do detetor de nível de fluído;

Por fim, a comunicação entre a aplicação informática (PC) e o sistema de ensaio também é feita por quatro cabos constituídos pelas seguintes fichas:

- Fichas D25 – responsável pela condução dos sinais de entrada e de saída digitais;
- Fichas D37 – responsável pela condução dos sinais de entrada e de saída analógicas;

Como complemento, um sistema flexível de ensaios pode ter sempre de suportar a necessidade de aquisição de sinais de outras grandezas associadas ao provete a ser ensaiado. Para isso, o sistema de controlo de um sistema flexível de ensaios, além de cumprir os requisitos de controlo de movimento é igualmente chamado a realizar funções típicas de um sistema de aquisição de sinais analógicos de grandezas físicas diversas.

Assim, pode fazer também parte da solução de um sistema flexível de ensaios a existência de uma unidade SFLT (Sistema Flexível de Leitura de Transdutores) que é nada mais do que um suplemento das capacidades do quadro de interface (QEI), apenas empregue caso seja necessário dispor de mais entradas analógicas para leitura de sinais de transdutores, no caso de um dispositivo de ensaio mais complexo. Por este motivo a ligação entre estes dois sistemas é também feita por meio de fichas D25 com 16 canais de leitura analógica extra disponíveis.

3 Desenvolvimento de propostas para sistemas de ensaio flexíveis

Após análise do funcionamento e compreensão da constituição base de um sistema de ensaios, é altura de avançar para a próxima etapa. Em primeiro lugar, parece sensato reunir todos os objetivos que se pretendem atingir com uma nova solução, detalhadamente.

Tendo como ponto de partida a máquina de ensaios de referência, será apresentada uma proposta para um sistema de ensaios assente nos conceitos anteriormente já abordados de flexibilidade, de modularidade e de configurabilidade. O *update* que é proposto ser feito a máquinas de ensaio tradicionais concentra-se sobretudo nas alterações hidráulicas, elétricas e no desenvolvimento do *software*, especialmente, nos requisitos do mesmo e nas possibilidades de controlo de posição, de velocidade e de força, consoante a constituição tanto dos eixos como da unidade hidráulica. Aliás, a palavra “progresso”, atualmente, não representa tanto a mudança do próprio mecanismo e da sua estrutura física, mas daquilo que lhe provoca e comanda o movimento e lhe garante um correto funcionamento. Nesta perspetiva, como próximas etapas deste trabalho, propõe-se o estudo das necessidades e da escolha dos componentes hidráulicos e elétricos para satisfazer a maior parte das ações que podem ser desempenhadas pelo sistema de ensaio flexível.

Com o culminar do estabelecimento destes objetivos será possível proceder-se à conceção das soluções e ao desenho dos esquemas hidráulicos e elétricos e, conseqüentemente, definição da solução construtiva dos quadros elétricos.

Finalmente, deve-se proceder à especificação detalhada das funções a cumprir pelo *software*. É de referir que se pretende desenvolver um sistema genérico que pode, ou não, estar a ser utilizado à sua capacidade máxima. Caso não esteja, serão recomendadas novas alternativas tendo sempre em atenção o custo final das mesmas.

3.1 Requisitos funcionais para o sistema de ensaios proposto

No subtópico 2.9, do capítulo anterior, foi feita uma abordagem dos objetivos principais de um sistema de ensaios flexível. Para dar início ao desenvolvimento de uma solução capaz de ultrapassar os pontos menos positivos das máquinas de referência, é fundamental entender quais os aspetos estruturais, hidráulicos, elétricos e de programação que devem ser alterados para se atingir os objetivos pretendidos.

Em primeiro lugar, a pesquisa de máquinas de ensaios tradicionais permitiu adquirir a sensibilidade necessária para notar as limitações das mesmas.

Na figura 3.1 apresenta-se uma máquina de ensaios de fadiga da conceituada empresa *Zwick Roell*. Observando a imagem, rapidamente se conseguem assinalar as semelhanças entre este sistema e as características que foram enunciadas na secção 2.7. Efetivamente, este mecanismo, projetado e construído para efetuar ensaios de fadiga, apresenta uma estrutura rígida com todos os elementos rigidamente ligados entre si. Não é possível dissociar a unidade energética, nem os eixos, da estrutura. Desta forma, o conceito de flexibilidade não é retratado nesta solução. À partida, tanto as dimensões dos eixos, como a capacidade da unidade energética caracterizam-se por terem características funcionais pré-definidas na conceção e projetadas para a aplicação em causa.

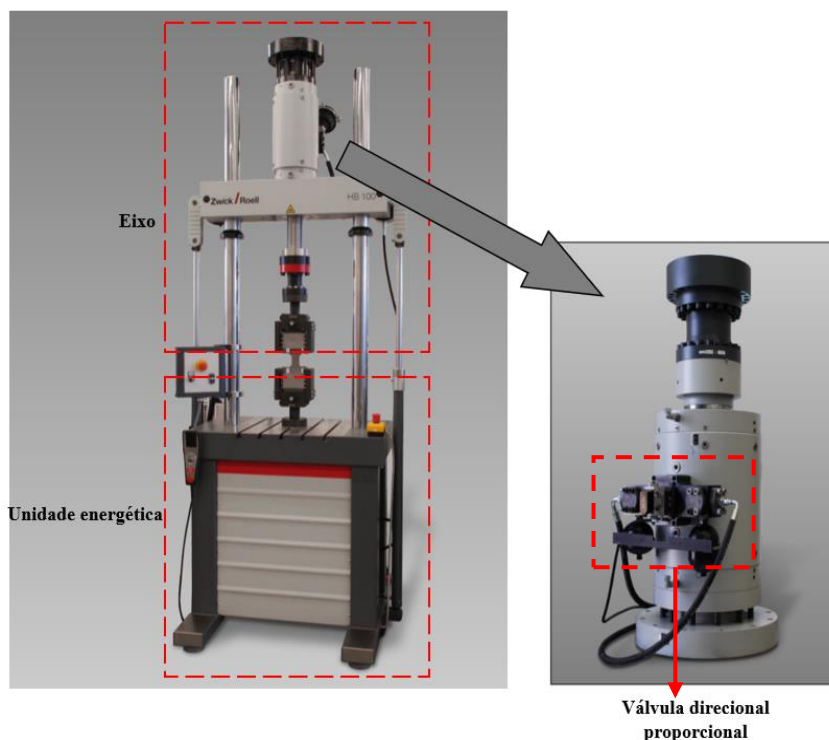


Figura 3.1 - a) Máquina servo-hidráulica de ensaios de fadiga; b) Servo

A falta de flexibilidade deste sistema é causada, essencialmente, pela não modularidade do mesmo. A separação deste em módulos interligados entre si, com soluções não rígidas, por exemplo fichas, permitiria, construtivamente, elaborar diferentes configurações físicas para o sistema. Nesta perspetiva, o sistema e acionamento e comando pode dividir-se em três módulos principais:

- o módulo referente à “unidade energética”,
- o módulo referente ao “eixo”, e
- o módulo dos quadros elétricos que, embora não esteja presente na figura, é essencial para o funcionamento do mecanismo.

Todavia, o resultado final do sistema será sempre limitado pela compatibilidade das características dos módulos selecionados. Portanto, é necessário ter consciência durante a fase de configuração que, apesar de ser inserido um servo atuador para uma dada carga e velocidade de ensaio, a cilindrada da bomba deve ser compatível com esses requisitos. Caso contrário, o sistema final será limitado pela unidade energética. Porém, o contrário também pode acontecer e o sistema ser limitado pelo servo atuador.

Estruturalmente, a máquina de ensaios de referência é constituída por todos os componentes necessários para o correto funcionamento da mesma. Tal como foi visto anteriormente, o uso da tecnologia servo-hidráulica e de uma válvula direcional proporcional de elevado desempenho permite que o mecanismo alcance a qualidade e o controlo exigidos num procedimento de ensaio. Na verdade, este tipo de máquinas de referência peca, não pela qualidade de execução, mas pela reduzida capacidade de adaptação. Assim, manter-se-á tanto a tecnologia utilizada, como a constituição de cada eixo – atuador hidráulico com movimento controlado pela válvula proporcional de elevado desempenho. Como foi analisado no capítulo 2, o aumento da eficiência energética do sistema, influenciada pelas elevadas quedas de pressão na válvula, por vezes exige a utilização de uma válvula de comando de dimensão superior às necessidades do mecanismo.

Relativamente às unidades energéticas, e reconhecendo que as potências desta gama de sistemas nunca serão muito elevadas (máximo de 20kW) e que as aplicações não se caracterizarão por funcionamento por longos períodos de tempo a velocidades muito baixas, a solução baseada numa unidade energética com “motor elétrico + variador de frequência” associado ao acionamento de uma bomba de cilindrada fixa, revela-se a opção mais satisfatória sob o ponto de vista económico e com adequados desempenhos e flexibilidade para as aplicações.

A grande divergência entre o sistema flexível e a máquina de referência é a falta de modularidade. A ligação entre o módulo da unidade energética e o do servo atuador, obrigatoriamente, será feito por tubagens para que o cilindro seja alimentado. Por não se tratar de uma ligação rígida, rapidamente se pode estabelecer a ligação com outro eixo ou com outra unidade energética.

Em termos elétricos, é pretendido que os quadros elétricos sejam versáteis, genéricos e que consigam suportar os requisitos de diferentes tipos de ensaios. De facto, para se proceder à elaboração de um quadro elétrico é imperativo conhecer os componentes que precisam ser comandados e a instrumentação que deve ser incluída para permitir o controlo adequado dos movimentos.

Um dos objetivos para o desenvolvimento do sistema de ensaios flexível é a possibilidade de se pretender fazer o controlo em posição, ou em velocidade, ou em força. Como a válvula direcional de elevado desempenho deve ser inserida num circuito em malha fechada, a colocação de uma célula de carga, no extremo da haste que contacta com o provete, e de um transdutor de posição no atuador permite um adequado *feedback* relativo ao comportamento do mecanismo.

Neste sentido, na constituição base de servo atuadores deve ser incluído um transdutor de posição e uma célula de carga associada a cada atuador.

3.2 Configuração de um Eixo

No tópico anterior foi mencionado que se manteria a constituição base dos eixos, já utilizada pelas máquinas de ensaio de referência. Todavia, estes devem sofrer um pequeno *update*, uma vez que deve ser inserido o conceito de flexibilidade.

Assim, apesar da constituição base – atuador, válvula direcional proporcional de elevado desempenho, transdutor de posição e célula de carga – foi considerada a hipótese de, eletricamente, o eixo suportar a introdução de mais dois possíveis transdutores auxiliares e de

mais duas válvulas hidráulicas auxiliares. Desta forma, dependendo da aplicação que o utilizador pretenda, cria-se a possibilidade de se fazer a leitura de outras variáveis associadas ao eixo, para além da posição e da força, expandindo a versatilidade da máquina.

A transição da posição de repouso para a posição central das válvulas de elevado desempenho, por vezes, é acompanhada por um movimento brusco que pode resultar em perturbações no controlo do sistema. Assim, caso se pretenda eliminar essa instabilidade é possível juntar uma válvula auxiliar que impeça a passagem de caudal até que a válvula direcional proporcional atinja uma posição estável.

A tabela 3.1 apresenta, detalhadamente, os sinais elétricos que devem ser considerados entre o quadro elétrico e cada um dos eixos, de acordo com a constituição deste.

Tabela 3.1 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização de um eixo.

Tipo de Sinal	Função
24 VDC seguros	Alimentação de válvulas
24 VDC Sinal	Alimentação de transdutores associados aos eixos
Entrada digital	Monitorização da ficha
Entrada Analógica	Transdutor de posição
Entrada Analógica	Transdutor de força
Entrada Analógica	Transdutor auxiliar 1
Entrada Analógica	Transdutor auxiliar 2
Saída Digital	Válvula auxiliar 1
Saída Digital	Válvula auxiliar 2
Saída Analógica	Válvula direcional proporcional de elevado desempenho

Neste estudo entendeu-se ainda restringir o comando/monitorização do sistema apenas a dois eixos. Esta limitação não compromete o alcance da máquina às diferentes aplicações, já que a maioria das máquinas de ensaio também requerem, frequentemente, somente um ou dois eixos.

Evita-se, assim, um sobredimensionamento do circuito elétrico para a maior parte das aplicações e o incremento no custo final do equipamento.

3.3 Configuração de uma Unidade energética

Definida e analisada a constituição de um eixo, é altura de concentrar este estudo nas configurações possíveis de “unidades energéticas”. O módulo referente à constituição dos quadros elétricos, por apresentar grande dependência das características tanto de servo atuadores como de unidades energéticas, deverá ser o último a ser estudado. Para que se consiga entender quais as características que devem ser abrangidas pela solução apresentada, por forma a conseguir suportar unidades distintas, devem-se estudar os tipos de unidades energéticas capazes de cumprir os objetivos de cada aplicação.

3.3.1 Unidade Energética do “Tipo I”

3.3.1.1 Descrição

De forma a tornar a análise das unidades energéticas o mais compreensível possível, esta deve ser feita por ordem crescente de complexidade de solução. Assim, optou-se por iniciar o estudo com a solução mais simples e tradicional, mas capaz de desempenhar as funções pretendidas.

Na figura 3.2 apresenta-se uma solução hidráulica para a unidade energética tipo I, em duas versões, sendo uma sem a inclusão de um acumulador hidráulico (a) e a outra com a inclusão de um acumulador hidráulico (b). Em termos de exigências de comando estas duas soluções são iguais. A versão a) é, em princípio, dirigida a aplicações com menores requisitos de energia e com um funcionamento por curtos períodos de tempo. A versão b) pode cumprir requisitos superiores de energia instantânea, sem isso justificar maior potência instalada.

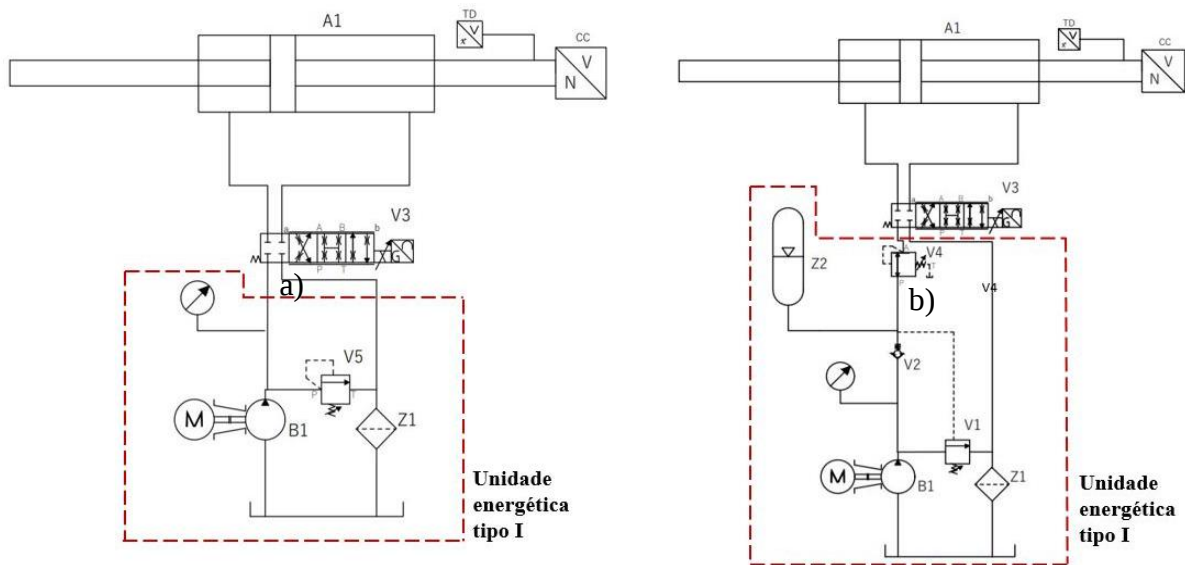


Figura 3.2 – a) Unidade hidráulica “tipo I” sem acumulador. b) Unidade hidráulica “tipo I” com acumulador.

Genericamente, esta é constituída por:

Tabela 3.2 - Componentes da unidade energética tipo I, na versão com acumulador b).

Componente	Símbolo	Módulo
Bomba hidráulica	B1	Unidade energética
Válvula de carga de acumulador	V1	Unidade energética
Válvula de retenção	V2	Unidade energética
Válvula direcional proporcional de elevado desempenho	V3	Eixo
Válvula redutora de pressão	V4	Unidade energética
Filtro de óleo	Z1	Unidade energética
Acumulador hidráulico	Z2	Unidade energética
Atuador hidráulico linear simétrico	A1	Eixo
Transdutor de posição	TD	Eixo
Célula de carga	CC	Eixo

Em termos elétricos, esta unidade energética pressupõe a existência dos seguintes sinais:

Tabela 3.3 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização da unidade energética tipo I.

Tipo de Sinal	Função
220 VAC	Alimentação trifásica
24VDC Seguros	Alimentação de válvulas
24VDC Sinal	Alimentação dos elementos de instrumentação
Saída Digital	Comando de Motor de baixa potência ($\leq 1,5\text{kW}$)
Entrada Digital	Monitorização de Contactor/ <i>Soft starter</i> do motor
Entrada Digital	Monitorização Filtro
Entrada Digital	Monitorização Nível
Entrada Digital	Monitorização de botão de Segurança

A presença do acumulador, tal como já foi referido anteriormente, é importante nas máquinas de ensaio na medida em que, por vezes, alguns movimentos requerem um caudal instantâneo aumentado que pode não estar disponível na bomba, dada a sua cilindrada fixa. Desta forma, a capacidade em caudal presente transitoriamente no acumulador irá completar as necessidades do sistema.

Por outro lado, o uso de um acumulador traduz-se num aumento da capacidade de resposta dinâmica do sistema, uma vez que há sempre caudal disponível para eventuais requisitos do servomecanismo que devem ser atendidos no imediato. No entanto, as oscilações de pressão no acumulador podem influenciar negativamente a capacidade de controlo do sistema, pois a pressão à entrada da válvula proporcional de elevado desempenho deixará de ser constante. Assim, através da colocação de uma válvula redutora de pressão é possível definir a pressão à entrada da válvula direcional de elevado desempenho independentemente do estado de carga do acumulador. O valor de ajuste da válvula redutora de pressão deve ser sempre inferior ao valor mínimo de pressão no acumulador.

De acrescentar que a presença de um acumulador, juntamente com uma válvula de carga, não tem qualquer implicação em termos de sinais elétricos e de programação. A válvula de carga impede que a pressão à entrada do acumulador ultrapasse o valor máximo admissível pelo circuito. Assim, quando a pressão no acumulador atinge o valor máximo, a válvula de carga abre e direciona livremente o caudal da bomba para o reservatório, evitando que o caudal da bomba seja libertado à pressão máxima. Desta forma, a pressão no acumulador hidráulico será mantida entre o seu valor de pressão máximo e o seu valor de pressão mínimo, sendo a relação destes valores geralmente dentro da relação 1:0,8.

A unidade energética do tipo I é o ponto de partida. Trata-se da solução mais simples, uma vez que se restringe aos componentes base de um circuito hidráulico e que pode, no limite, incluir, ou não, o acumulador hidráulico, tal como pode ser observado na figura 3.2, que afinal tem como justificação acrescida a potencial diminuição da potência a instalar numa solução e assim a melhoria inerente da sua eficiência energética.

A monitorização do nível de fluído e do estado de colmatagem do filtro, feita através de detetores, informa o autómato quando o nível de óleo se encontra abaixo do limite inferior e quando o filtro, localizado no retorno do fluído ao reservatório, fica colmatado.

O movimento do atuador até à posição desejada deve ser feito a uma velocidade limite predeterminada, por razões de segurança, que deve ser definida pelo sistema.

Se, porventura, o atuador quando chegar à posição desejada estiver sujeito a uma carga, então a carga é entendida como uma perturbação cujos efeitos devem ser anulados. Apenas desta forma se consegue manter o atuador na posição pretendida, com velocidade nula.

3.3.1.2 Controlo do movimento

Compreender o método utilizado no controlo do movimento permitirá entender se a solução tipo I é adequada para o controlo de posição e posteriormente de velocidade de um eixo do sistema de ensaios.

Assim, o controlo de posição pode ser representado pelo diagrama de blocos da figura 3.3.

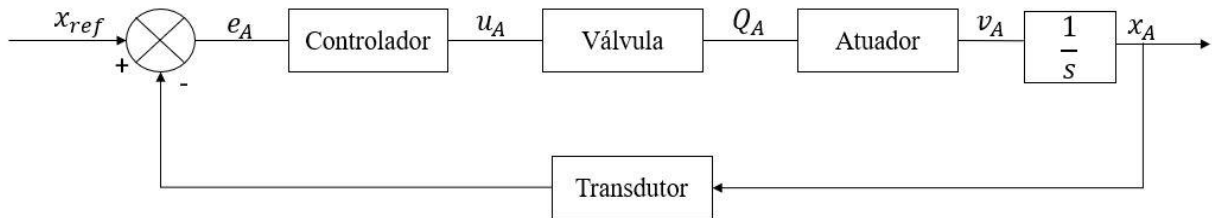


Figura 3.3 - Diagrama de blocos para controlo de posição.

Relativamente aos ganhos dos componentes, o sistema pode ser traduzido pela figura 3.4, na qual a função de transferência da válvula, embora não linear, é entendida com $\Delta p_{P \rightarrow A} = \text{constante}$.

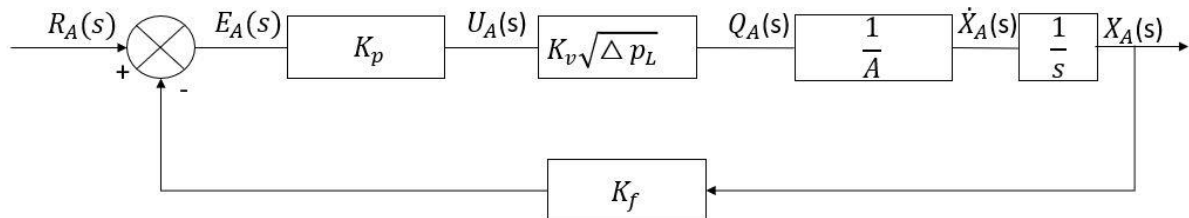


Figura 3.4 - Diagrama de blocos com a respetiva função de cada componente.

A função transferência deste sistema é dada pela seguinte equação.

$$\frac{X_A(s)}{R_A(s)} = \frac{K_p K_v \sqrt{\Delta p} \frac{1}{As}}{1 + K_p K_v \sqrt{\Delta p} \frac{1}{As} K_f} = \frac{1}{K_f} \frac{1}{\frac{As}{K_p K_v \sqrt{\Delta p} K_f} + 1} \quad (3.1)$$

Verifica-se então que o sistema em análise é de primeira ordem. A sua constante de tempo, τ , é traduzida pela equação 3.2.

$$\tau = \frac{A}{K_p K_v \sqrt{\Delta p} K_f} \quad (3.2)$$

Desta forma, para que o sistema seja relativamente rápido na resposta aos requisitos de controlo em posição é importante manter a constante de tempo num valor objetivo desejado.

Analisando a expressão, é de notar que o ganho do controlador pode ser ajustado, mas o ganho da válvula e do transdutor são valores fixos.

Por outro lado, embora tenha sido afirmado que a queda de pressão na passagem da válvula ($\Delta p_{P \rightarrow A} = \text{constante}$) esta é efetivamente dependente da carga a que o atuador está exposto. Assim, para situações com ausência de carga, a queda de pressão na passagem da válvula é elevada e, dessa forma, pode-se garantir que a constante de tempo seja reduzida. Porém, na presença de carga importante no atuador, o valor de $\Delta p_{P \rightarrow A}$ é menor e, por isso, a constante de tempo deixa de ter o valor pretendido. É, assim, necessário compensar esta diminuição do ganho da válvula com um aumento do ganho associado ao controlador.

Para se proceder a esta compensação pode-se incluir no controlador um ajuste do seu comando à válvula que represente a relação entre a queda de pressão na passagem da válvula para a condição de carga nula no atuador $\Delta p_{P \rightarrow A0}$ e o valor efetivo que reflete a existência de uma carga $\Delta p_{P \rightarrow A}$, tal como representado na figura 3.5. Esta compensação é facilmente realizada já que se pode recorrer à medição da força pela célula de carga presente no eixo. Assim, conhecendo o valor da queda de pressão com o sistema sujeito a uma carga, calcula-se a compensação para se proceder ao acerto do comando do controlador.

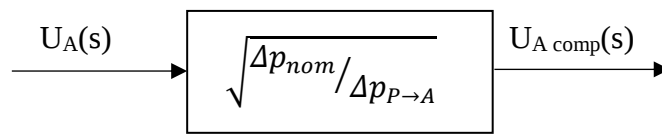


Figura 3.5 - Compensador para ajuste do comando do controlador à válvula direcional de elevado desempenho proporcional.

Conclui-se, portanto, que a unidade energética do tipo I, quando é associada a um eixo em controlo de posição, pode ter a sua característica não influenciada pela carga no atuador, uma vez que o eixo possui uma célula de carga a si associada e que não pode ser dissociável. Essa característica, no entanto, fica associada ao ganho da válvula para a condição de carga nula no atuador, que é encarado como um parâmetro de referência.

Relativamente ao controlo de velocidade, também é importante entender até que ponto este é feito corretamente com a utilização da unidade energética aqui proposta. De facto, este controlo não é nada mais que um controlo de uma posição linearmente variável no tempo, ou seja, pode ser representado por uma trajetória do tipo rampa.

Assim, se para o caso da posição temos uma resposta a uma referência em degrau de valor A, representada pela expressão matemática 3.3,

$$X_A(s) = \frac{1}{K_f} * \frac{1}{\zeta s + 1} * \frac{A}{s} \quad (3.3)$$

Então, a aproximação do tipo rampa para o controlo de velocidade é dada pela expressão 3.4.

$$X_A(s) = \frac{1}{K_f} * \frac{1}{\zeta s + 1} * \frac{A}{s^2} \quad (3.4)$$

O erro desta aproximação do tipo rampa pode ser dado pela seguinte expressão.

$$E_r(s) = \frac{A}{s^2} - K_f \cdot X_A(s) = \frac{A}{s^2} - \frac{1}{\zeta s + 1} * \frac{A}{s^2} \quad (3.5)$$

A tradução deste erro no domínio temporal, segundo o teorema do valor final, é dada pela expressão 3.6.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s E_r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s * \left(\frac{A}{s^2} - \frac{1}{\zeta s + 1} * \frac{A}{s^2} \right) = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{A}{s^2} * \left(1 - \frac{1}{\zeta s + 1} \right) \quad (3.6)$$

Resolvendo a expressão 3.6, e levantando a indeterminação chega-se a:

$$e(\infty) = A\zeta \quad (3.7)$$

Pelo que, o erro nunca será nulo no controlo associado à velocidade, a menos que se adicione um termo integral. No entanto, mesmo nesta situação, apesar do erro tender para zero, continuará a beneficiar do compensador de carga para que o seu comportamento seja independente da carga.

3.3.1.3 Linearização da característica da válvula direcional

Depois de estudada a arquitetura de controlo do movimento, é importante encontrar as relações entre as variáveis inseridas no comando. O movimento do atuador é conseguido através do caudal enviado pela válvula direcional de elevado desempenho proporcional. Esta, por sua vez, fornece ao atuador o caudal que a atravessa, de acordo com a abertura da sua gaveta, dependente do sinal de tensão enviado ao seu solenoide. Conhecido o caudal que é enviado para o atuador e as características do mesmo, a qualquer momento o sistema consegue calcular a velocidade do cilindro. A relação entre o caudal enviado para o atuador e a velocidade do mesmo é dada pela seguinte expressão:

$$Q_A = v_A * A_A \quad (3.8)$$

Sendo A_A , a área da câmara motora do atuador.

Contudo, esta relação não é suficiente para se conseguir controlar o movimento do atuador. Para atingirmos uma certa velocidade, a partir de um caudal enviado pela válvula direcional proporcional de elevado desempenho, é necessário conhecer a relação deste com o deslocamento da gaveta e, por sua vez, com o sinal de tensão enviado. O conhecimento destas relações passa muito pelo estudo das informações fornecidas pelo fabricante das válvulas [17].

Assim, recorrendo ao catálogo da empresa *Parker*, na secção das válvulas direccionais proporcionais de elevado desempenho, pode-se retirar o gráfico apresentado na figura 3.6, que relaciona a percentagem de caudal com a percentagem de sinal de comando dado à válvula.

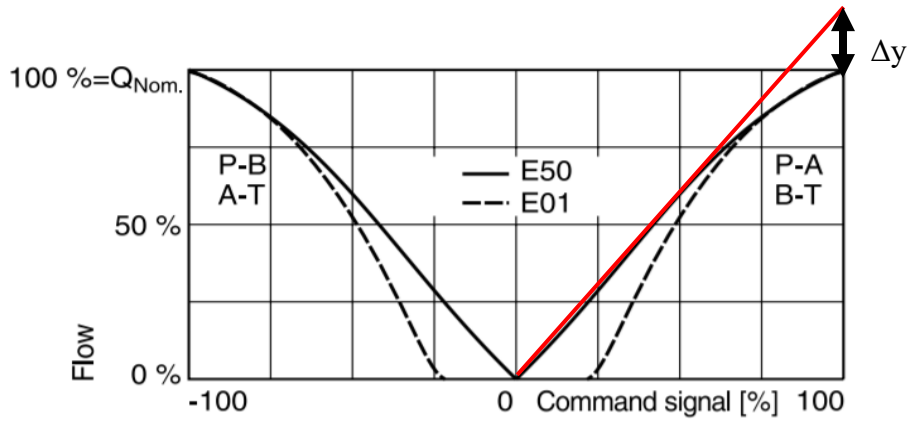


Figura 3.6 - Relação entre a percentagem de caudal e a percentagem de sinal de comando, segundo o tipo de gaveta da válvula [16].

Desta forma, torna-se redundante o conhecimento do deslocamento da gaveta. Contudo, caso isso seja relevante para uma dada aplicação, a própria válvula de elevado desempenho faz a monitorização do deslocamento da sua gaveta, pelo que apenas é necessário fazer a leitura do sinal que esta envia. Para realizar o comando em malha fechada do movimento de um atuador uma válvula com a característica do tipo E01 não é adequada, tendo em consideração a sua zona morta de funcionamento. Analisando a curva E50, pode-se observar que a válvula em causa não apresenta recobrimento positivo da gaveta, dado que para todos os sinais de comando superiores ou inferiores a 0% há uma resposta do componente, traduzida pela variação de caudal que a atravessa.

Pode-se então concluir que, todas as variáveis para o controlo em velocidade são do conhecimento do utilizador. Porém, para se proceder a um controlo em malha fechada, feito automaticamente pelo controlador, a curva apresentada acima deve ser traduzida matematicamente. Até cerca de 50% do sinal de comando, a curva apresenta um comportamento linear pelo que a sua função pode ser traduzida por

$$y = kx + b \quad (3.9)$$

A partir dos 50% de comando, a curva passa a ser representada por uma função parabólica do tipo

$$y = -kx^2 \quad (3.10)$$

Conhecendo a relação entre o caudal escoado pela válvula e o caudal nominal, para diferentes valores de queda de pressão em cada passagem, dada por,

$$\frac{Q_A}{Q_{nom}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{P \rightarrow A}}{\Delta p_{nom}}} \quad (3.11)$$

Obtém-se então a expressão que relaciona o caudal com o sinal de comando.

$$Q_A(V) = Q_{nom} \sqrt{\frac{\Delta p_{P \rightarrow A}}{\Delta p_{nom}}} \left[k_1 \left(\frac{V}{V_{máx}} \right) - k_2 \left(\frac{V}{V_{máx}} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

Sendo $k_1 = 1 + \Delta y$ e $k_2 = \Delta y$

Analisando a expressão anterior, verifica-se que, como o sistema não inclui transdutores de pressão, o valor da pressão à entrada do atuador não é conhecido. Contudo, através de cálculo matemático é possível traduzir $\Delta p_{P \rightarrow A}$ em função da pressão de alimentação, p_P , caso este valor seja conhecido.

Como a relação entre $\Delta p_{P \rightarrow A}$ e p_P é dependente da simetria ou não do atuador é necessário fazer o estudo para dois casos possíveis, assumindo que não se utilizarão válvulas assimétricas.

1. Válvula direcional proporcional de elevado desempenho simétrica e atuador assimétrico, como apresentado na figura 3.7 para o avanço e figura 3.9 para o recuo.

Avanço

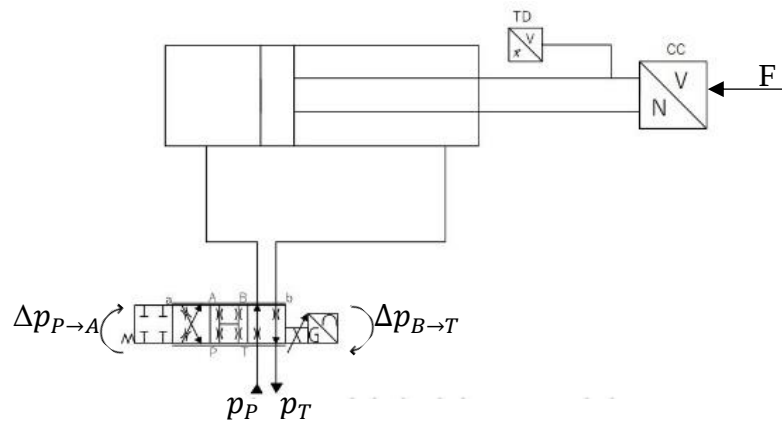


Figura 3.7 - Esboço do circuito hidráulico com atuador assimétrico em avanço e válvula proporcional de elevado desempenho simétrica.

Pelo equilíbrio de forças

$$p_A A_1 = p_B A_2 + F \leftrightarrow p_B = p_A \alpha - \frac{F}{A_2} \quad (3.13)$$

Sendo,

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} \quad (3.14)$$

Como o atuador não é simétrico, a razão entre o caudal de entrada e o de saída não é igual a 1, mas sim igual à razão entre as áreas das câmaras do atuador.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1}{A_2} \leftrightarrow \sqrt{\frac{\Delta p_{P \rightarrow A}}{\Delta p_{B \rightarrow T}}} = \alpha \leftrightarrow \frac{p_P - p_A}{p_B} = \alpha^2 \quad (3.15)$$

Substituindo p_B pela relação encontrada na equação 3.13 obtém-se,

$$p_A = \frac{p_P + \alpha^2 \frac{F}{A_2}}{\alpha^3 + 1} \quad (3.16)$$

Encontrada a relação entre p_A e p_P , o cálculo da tensão do sinal de comando apenas fica dependente do valor de pressão à saída da bomba. Como a unidade energética não apresenta transdutores de pressão, para a medição da pressão à sua saída, é necessário fazer o seu cálculo. A pressão p_P é então calculada para as condições máximas do

sistema, considerando que esta se mantém fixa. Na verdade, na unidade tipo I assume-se que não há ajuste desta pressão. Porém, o valor obtido terá sempre um erro associado que só poderá ser eliminado na presença de um transdutor.

Como as quedas de pressão na válvula são dependentes da carga a que o sistema está exposto, tal como pode ser visualizado na figura 3.8. Neste caso, pretende-se então fazer o cálculo de p_P através da curva dos 100% de sinal de comando.

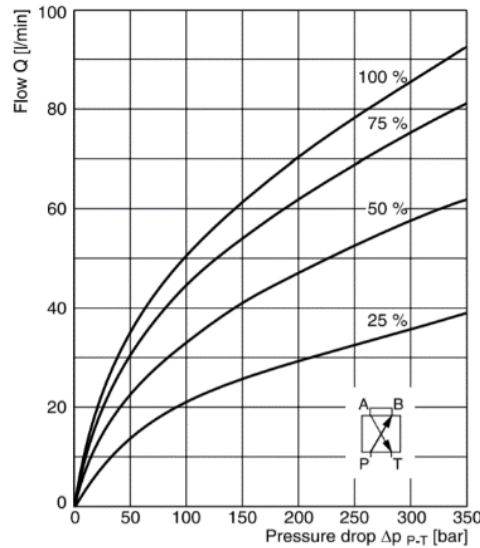


Figura 3.8 - Caudal de P para B ou A para T em função da queda de pressão de P para T [16].

Novamente, através da equação 3.8 e através da medição constante da velocidade do atuador, para a abertura máxima da gaveta da válvula, obtém-se o valor de caudal.

O cálculo da queda de pressão na válvula, tal como podemos ver na figura 3.8, foi feito com a ligação entre os orifícios A e B.

As curvas apresentadas são matematicamente traduzidas por,

$$Q = \text{constante} \sqrt{\frac{\Delta p_{P \rightarrow T}}{\text{constante}}} \quad (3.17)$$

No caso em estudo, como o circuito é constituído por um atuador assimétrico, a relação entre a queda de pressão de P para A e a queda de pressão de P para T depende da relação de áreas do atuador.

Pela expressão,

$$\Delta p_{P \rightarrow T} = \Delta p_{P \rightarrow A} + \Delta p_{B \rightarrow T} \quad (3.18)$$

Sabendo que $\Delta p_{B \rightarrow T} = p_B$ e pela equação 3.13 conclui-se que

$$\Delta p_{B \rightarrow T} = \frac{\Delta p_{P \rightarrow A}}{\alpha^2} \quad (3.19)$$

Desta forma, pode-se considerar que,

$$\Delta p_{P \rightarrow A} = \frac{\Delta p_{P \rightarrow T}}{(1 + \frac{1}{\alpha^2})} \quad (3.20)$$

Para esta situação, a curva é então dada por,

$$Q_A = Cd * \pi * x_{máx} * \phi_v \sqrt{\frac{\Delta p_{P \rightarrow T} / (1 + \frac{1}{\alpha^2})}{\rho}} \quad (3.21)$$

Com a relação que foi estabelecida na equação 3.13 e na equação 3.16, o caudal calculado é apenas relacionado com p_P , o que significa que o valor de p_P pode ser calculado a partir de uma condição de velocidade e de carga conhecidas.

Recuo

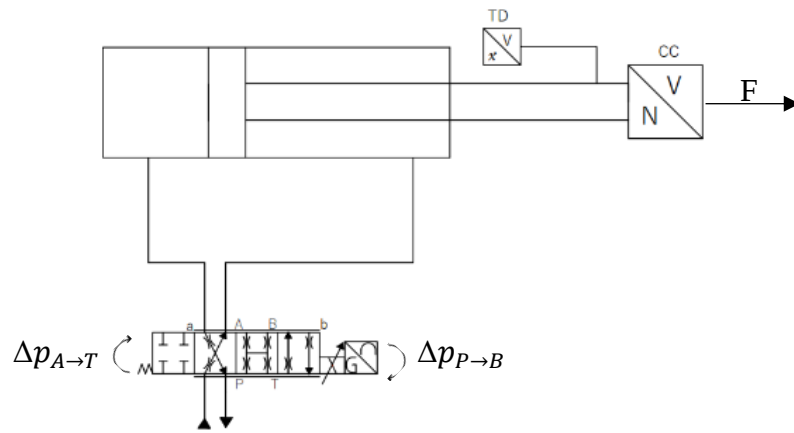


Figura 3.9 - Esboço do circuito hidráulico com atuador assimétrico em recuo e válvula proporcional de elevado desempenho simétrica.

Com a mesma linha de pensamento tida no avanço do atuador, podem-se obter as seguintes expressões,

$$p_A A_1 + F = p_B A_2 \leftrightarrow p_A = \frac{p_B}{\alpha} - \frac{F}{A_1} \quad (3.22)$$

$$p_A = \alpha^2 (p_P - p_B) \leftrightarrow p_B = \frac{\alpha^2 p_P + \frac{F}{A_1}}{\frac{1}{\alpha} + \alpha^2} \quad (3.23)$$

Novamente, pelo processo utilizado anteriormente para se calcular p_P , todas as variáveis ficam identificadas.

2. Válvula direcional proporcional de elevado desempenho simétrica e atuador simétrico, como apresentado na figura 3.10 para o avanço e na figura 3.11 para o recuo.

Avanço:

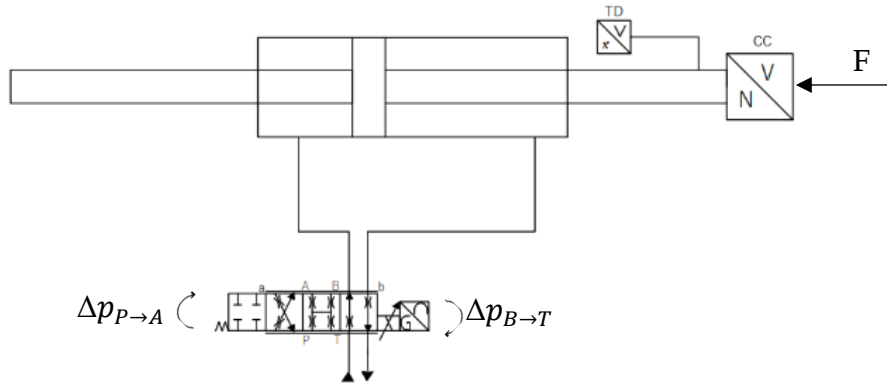


Figura 3.10 - Esboço do circuito hidráulico com atuador simétrico em avanço e válvula proporcional de elevação simétrica.

Para esta condição, a razão de áreas do cilindro é igual a 1. Por este motivo pode-se afirmar que a queda de pressão de P para A é igual à queda de pressão de B para T. Mais uma vez, aplicando o equilíbrio de forças, conclui-se que,

$$p_B = p_A - \frac{F}{A_2} \quad (3.24)$$

Pela expressão de igualdade das quedas de pressão na válvula obtém-se,

$$p_A = \frac{p_P + \frac{F}{A_2}}{2} \quad (3.25)$$

Para situações com atuador simétrico, como a relação de áreas é igual a 1, então $\Delta p_{P \rightarrow A} = (\Delta p_{P \rightarrow T})/2$. Com esta relação e pelo procedimento utilizado anteriormente, calcula-se o valor da pressão na fonte.

Recuo:

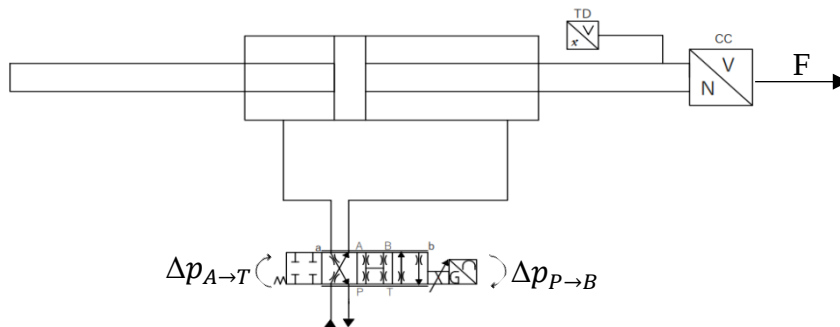


Figura 3.11 - Esboço do circuito hidráulico com atuador simétrico em recuo e válvula proporcional de elevação simétrica.

No recuo, para o mesmo procedimento utilizado até agora obtém-se

$$p_A = p_B + \frac{F}{A_1} \quad (3.26)$$

$$p_B = \frac{p_P}{2} - \frac{F}{2A_1} \quad (3.27)$$

Com todo o estudo feito até aqui, rapidamente se conclui que a introdução de transdutores de pressão antes da válvula de elevado desempenho e antes do atuador, facilitaria todo o processo de controlo, pois rapidamente se obteria o valor da queda de pressão na válvula, para qualquer valor de pressão na fonte.

O servomecanismo deve, portanto, ser capaz de se adaptar a outras unidades energéticas, dado que nem todas as aplicações poderão ser satisfeitas com a unidade energético tipo I.

3.3.2 Unidade energética “Tipo II”

3.3.2.1 Descrição

Apesar da unidade energética tipo I cumprir com alguns dos objetivos propostos neste estudo, esta não parece muito versátil face ao leque de aplicações que se pretendem abranger. A regulação da pressão à entrada do circuito é feita manualmente e, caso isso aconteça, o seu valor deixa de corresponder ao valor calculado para as capacidades máximas do sistema e o cálculo da queda de pressão na válvula deixará de ser possível. Desta forma, ainda que possa ser considerado um controlo em malha fechada, o controlo de p_p não está totalmente incorporado. Para além do mais, o conceito de eficiência energética pode ser considerado como não suficientemente satisfeito nessa solução. Revelou-se, portanto, necessário proceder à consideração de uma unidade energética do tipo II.

Na figura 3.12 apresenta-se uma nova solução para o sistema em desenvolvimento.

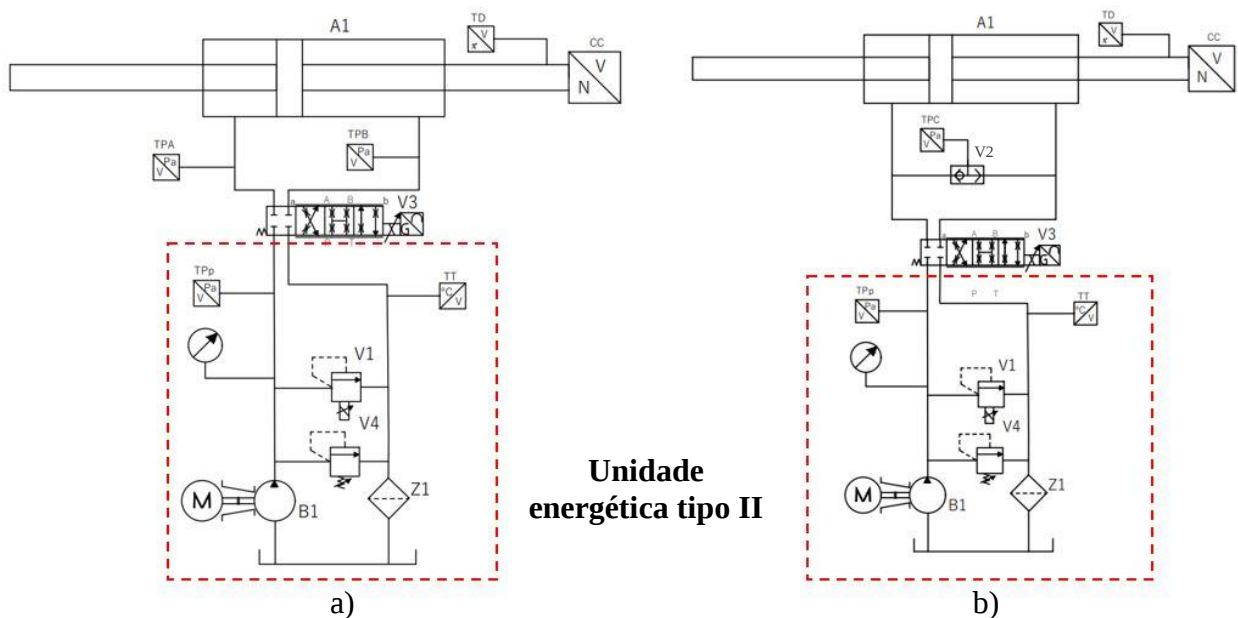


Figura 3.12 – a) Unidade hidráulica tipo II com dois transdutores para medição da pressão na carga. b) Unidade hidráulica tipo II com um transdutor para a medição da pressão na carga.

A constituição do circuito apresentado é descrita na tabela que se segue.

Tabela 3.4 - Componentes da unidade energética tipo II.

Componente	Símbolo	Módulo
Bomba hidráulica de cilindrada fixa	B1	Unidade energética
Válvula limitadora de pressão proporcional	V1	Unidade energética
Válvula “OU”	V2	Eixo
Válvula direcional proporcional de elevado desempenho	V3	Eixo
Válvula de segurança	V4	Unidade energética
Filtro de óleo	Z1	Unidade energética
Atuador hidráulico linear simétrico	A1	Eixo
Transdutor de posição	TD	Eixo
Célula de carga	CC	Eixo
Transdutor de pressão	TP _p	Unidade energética
Transdutor de pressão para medição da pressão na carga	TP _A	Eixo
Transdutor de pressão para medição da pressão na carga	TP _B	Eixo
Transdutor de pressão para medição da pressão na carga	TP _C	Eixo
Transdutor de temperatura	TT	Unidade energética

Em termos elétricos, o circuito elétrico apresenta as seguintes exigências.

Tabela 3.5 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização da unidade energética tipo II.

Tipo de Sinal	Função
220 VAC	Alimentação trifásica
24 VDC seguros	Alimentação de válvulas
24 VDC Sinal	Alimentação dos componentes de instrumentação
Saída Digital	Motor ($\geq 1,5\text{kW}$) e ($< 5,5\text{kW}$)
Entrada Digital	Monitorização do Contactor / <i>Soft starter</i>
Entrada Digital	Monitorização do filtro
Entrada Digital	Monitorização do nível de fluído
Entrada Digital	Monitorização de segurança
Entrada Analógica	Transdutor de pressão
Entrada Analógica	Transdutor de temperatura
Saída Analógica	Válvula limitadora proporcional de pressão

A unidade energética tipo II, relativamente à unidade do tipo I, apresenta um transdutor de pressão à saída da bomba, um transdutor de temperatura e uma válvula limitadora proporcional de pressão. Por outro lado, neste circuito não faz sentido colocar um acumulador hidráulico, dado que este funciona a pressão constante na fonte. Com a aplicação da válvula limitadora de pressão proporcional, a pressão é ajustável e, conseqüentemente, a queda de pressão na válvula também. Por outro lado, com a aplicação desta válvula, o motor nunca arranca em carga. O transdutor de pressão, em conjunto com a válvula limitadora de pressão proporcional, permite o controlo total do circuito em malha fechada. Dependendo da abertura da válvula limitadora proporcional, o caudal enviado para o reservatório pode ser em maior ou menor quantidade.

A medição da temperatura do fluido é de grande importância, uma vez que a viscosidade é sensível às variações da temperatura, podendo comprometer o correto funcionamento do sistema de ensaios. Por este motivo, a definição da gama de temperatura a que o circuito deve trabalhar permite que o sistema restrinja o seu funcionamento exclusivamente ao intervalo de valores adequados.

Na verdade, a eficiência energética, nesta solução, ainda não se encontra no patamar desejado, na medida em que parte da energia é perdida no caudal que é enviado diretamente para o reservatório, provocando o aquecimento desse fluido de trabalho. Contudo, sendo esta solução de unidade energética tipicamente para unidades de pequena/média potência a eficiência energética pode ainda não ser considerada particularmente crítica.

3.3.2.2 Controlo do movimento

Relativamente ao controlo do movimento, este é feito com o mesmo raciocínio tido para a unidade energética do tipo I. No entanto, com esta solução, o controlador ao ter acesso à leitura dos transdutores de pressão consegue identificar, a todo o momento, quer a pressão p_P , quer o valor da pressão na carga através de Tp_A e Tp_B ou através de Tp_C . A leitura da queda de pressão na válvula, também com a ajuda dos transdutores anteriores, permite que a válvula limitadora de pressão proporcional se consiga ajustar, de tal forma que Δp_L tenha em cada momento o valor que seja desejado, nomeadamente, um valor constante. Assim, o controlo do sistema deixa de ser dependente da carga, revelando-se mais consistente.

No entanto, é aumentado o nível de complexidade no controlo, uma vez que em paralelo ao controlo do movimento, é fundamental que seja feito o controlo da diferença de pressão através do comando da válvula limitadora de pressão proporcional.

Desta forma, como todas as pressões são conhecidas, calcula-se o caudal enviado para a câmara motora, de acordo com a velocidade que se pretende para o sistema e, pela equação 3.12 obtém-se o sinal de comando que deve ser enviado para a válvula direcional. Por outro lado, com as características do atuador também é possível conhecer a velocidade do cilindro, pela equação 3.8.

Com a solução de unidade do tipo II pode-se ajustar a queda de pressão na válvula ao valor que se pretende e, por isso, ter mais ou menos caudal a atravessar essa válvula direcional. Assim, se se proceder ao ajuste da pressão da fonte para um valor Δp_L acima da pressão na carga, o processo de controlo de força será mais fácil, como será analisado mais à frente. O aumento de pressão apenas deve acontecer para permitir aumentar a velocidade do sistema ou para reagir a alterações rápidas de pressão na carga.

3.3.3 Unidade energética do “Tipo III”

3.3.3.1 Descrição

O desperdício de caudal do servomecanismo, aqui em estudo, resulta da inadaptabilidade do caudal da bomba à exigência de consumo por parte do sistema. Na primeira solução, como se considerou p_P fixo, quando o acumulador atingia a sua capacidade máxima, todo o caudal excedente era enviado para o reservatório. O mesmo aconteceu com a solução II. O ajuste da pressão através da válvula limitadora de pressão proporcional somente adianta ou atrasa a abertura da mesma, mas o caudal em excesso continua a ser enviado para o reservatório.

Todavia, na unidade energética anterior, o caudal é libertado a um valor de pressão mais adequado para minorar as perdas energéticas ou para melhorar o controlo.

Uma terceira solução que também deve ser considerada, em certas aplicações, é a inclusão de uma fonte de caudal variável com a introdução de um variador de velocidade no acionamento da bomba. Este componente permite controlar a velocidade do motor que, por sua vez, determina o caudal que a bomba envia para o circuito. Este ajuste constante do caudal que a bomba fornece e que deve ser ligeiramente superior ao que é pedido pelo circuito, permite reduzir a quantidade de fluido direcionado para o reservatório, diretamente. Mais uma vez, pode-se efetuar o controlo total do sistema em malha fechada, pelo que o controlador pode dar ordem para desligar a bomba, caso verifique que o acumulador está à sua capacidade máxima e não há consumo de caudal.

Na figura 3.13 é apresentado o circuito do grupo energético III.

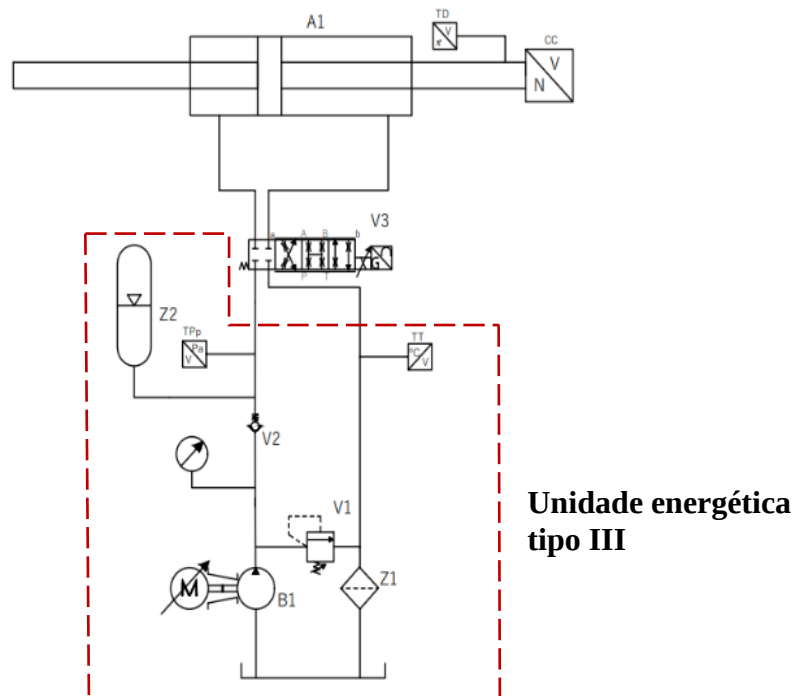


Figura 3.13 - Solução hidráulica tipo III.

Tabela 3.6 - Componentes da unidade energética tipo III.

Componente	Símbolo	Módulo
Bomba hidráulica	B1	Unidade energética
Válvula de segurança	V1	Unidade energética
Válvula de retenção	V2	Unidade energética
Válvula direcional proporcional de elevado desempenho	V3	Eixo
Filtro de óleo	Z1	Unidade energética
Acumulador hidráulico	Z2	Unidade energética
Atuador hidráulico linear simétrico	A1	Eixo
Transdutor de posição	TD	Eixo
Célula de carga	CC	Eixo
Transdutor de pressão	TP _p	Unidade energética
Transdutor de temperatura	TT	Unidade energética

Em termos elétricos, os sinais que devem ser considerados são descritos na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Requisitos elétricos para o comando e monitorização da unidade energética tipo III.

Tipo de Sinal	Função
220 VAC	Alimentação trifásica
24 VDC seguros	Alimentação de válvulas
24 VDC Sinal	Alimentação dos transdutores de pressão e temperatura Alimentação do nível, filtro e monitorização da ficha
Saída Digital	Motor ($\geq 1,5\text{kW}$) e ($< 20\text{kW}$)
Entrada Digital	Monitorização de Contactor
Entrada Digital	Monitorização do filtro
Entrada Digital	Monitorização do nível de fluido
Entrada Digital	Monitorização de segurança
Entrada Analógica	Transdutor de pressão
Entrada Analógica	Transdutor de temperatura
Saída Analógica	Comando de variador de velocidade

A unidade energética do tipo III distingue-se da unidade tipo II por ter na sua constituição um variador de velocidade e não uma válvula limitadora proporcional de pressão. A aplicação de um VSD garante um aumento da eficiência energética do sistema. Mais uma vez, o controlo do circuito é feito em malha fechada e, por isso, a velocidade do motor é constantemente adaptada às necessidades do sistema ao longo do tempo.

Na presença de um variador de velocidade no circuito, o motor não será exposto a um arranque em carga, o que resultaria num motor sobredimensionado à aplicação. Por outro lado, não é necessário realizar um controlo rigoroso da pressão de alimentação, tal como acontece na solução tipo II, mas sim de caudal. Neste tipo de circuito a inclusão de um acumulador hidráulico permite fazer com que o caudal a ser gerado pela bomba não tenha que ser, em cada momento, igual ao caudal necessário para cumprir os requisitos do movimento.

Com a presença de um acumulador, e dispondo da leitura da pressão da fonte e, portanto, no acumulador, o comando da velocidade do motor deve ter como objetivo manter essa pressão dentro de um intervalo de variação pretendido, fornecendo ao acumulador o caudal necessário. Nesta situação, a pressão do acumulador oscila em torno de um valor de pressão pertencente ao intervalo de pressões de funcionamento desejado para este componente. Esta solução, contrariamente à unidade energética do tipo I, implica atenção na programação para fazer o controlo do valor lido pelo transdutor TP_p .

A necessidade de mais ou menos caudal da bomba é determinada pela velocidade instantânea do atuador. No caso de poderem existir desequilíbrios no circuito, como défice de caudal, a introdução de um acumulador atenua esses efeitos e a presença de um transdutor de pressão é indispensável.

A aplicabilidade das soluções do tipo II e do tipo III depende dos requisitos impostos ao comportamento do servomecanismo. Como já foi analisado na secção anterior, a solução hidráulica tipo II permite fazer um controlo da pressão do circuito e, por isso, é especialmente vocacionada para sistemas que tenham de ensaiar provetes a cargas muito diferentes, mas velocidades não muito variáveis, ou até relativamente baixas (pouco caudal). Por outro lado, a solução tipo III, como permite fazer o controlo do caudal, é mais direccionada para sistemas com velocidades de ensaio muito variáveis, embora as forças possam ser praticamente constantes. Se, porventura, uma aplicação apresentar variações tanto de força como de velocidade por longos períodos de tempo, então a combinação das soluções hidráulicas II e III seria a opção ideal.

3.3.3.2 Controlo do movimento

O controlo do movimento, nesta situação, é feito com um procedimento mais simples. Novamente, calculando a queda de pressão na válvula, o controlo da velocidade do motor e, consequentemente, da bomba, deverá fornecer ao sistema o caudal suficiente para satisfazer os requisitos da carga, mas também manter Δp_L constante. Desta forma, tal como na solução II, o circuito deixa de ser dependente da carga, para efeitos de controlo.

Através da equação 3.8 é dado o caudal em função da velocidade pretendida para o atuador e a área da câmara do cilindro. Posteriormente, para saber qual a percentagem de sinal que deve ser enviado à válvula utiliza-se a expressão matemática 3.12 que traduz a curva apresentada na figura 3.6. A pressão de alimentação, neste circuito, é lida pelo transdutor de pressão que foi considerado.

3.4 Controlo de força

O controlo de força de um atuador hidráulico é sempre uma aplicação difícil de ser realizada com rigor e estabilidade. Normalmente, para aplicações com níveis de exigência elevados, este controlo deve ser efetuado em malha fechada. A utilização de malha aberta deverá ser pensada apenas para situações que não requeiram rigor neste controlo.

Habitualmente, os procedimentos que requerem controlo “em força” pressupõem a existência de duas etapas sequenciais. Inicialmente, há sempre uma etapa de movimento “sem carga”, a designada fase de aproximação, onde o controlo é feito “em velocidade”. A partir do momento em que o atuador deteta a presença de carga, então passa-se para a etapa de “controlo em força”.

Na primeira etapa, o comando é essencialmente fixo para a velocidade que o utilizador definiu como sendo a desejada e que deve ser de valor bastante baixo.

Na segunda etapa, o comando é variável e a velocidade pode ser quase nula, ou não. Perante um controlo em força, sempre que a velocidade não for nula, haverá também uma limitação de velocidade. Para o sistema de ensaios flexível desenvolvido neste estudo, o controlo de força será feito através do comando do sinal enviado à válvula direcional proporcional de elevado desempenho. O facto deste tipo de válvulas não apresentar recobrimento positivo traduz-se numa desvantagem para este propósito, pois qualquer sinal enviado para a válvula, imediatamente, resulta num deslocamento da sua gaveta. A figura 3.14 apresenta o diagrama de blocos relativo ao controlo em força. A presença da célula de carga na constituição do eixo permite o controlo em malha fechada, de forma a garantir o rigor necessário nas máquinas de ensaio.

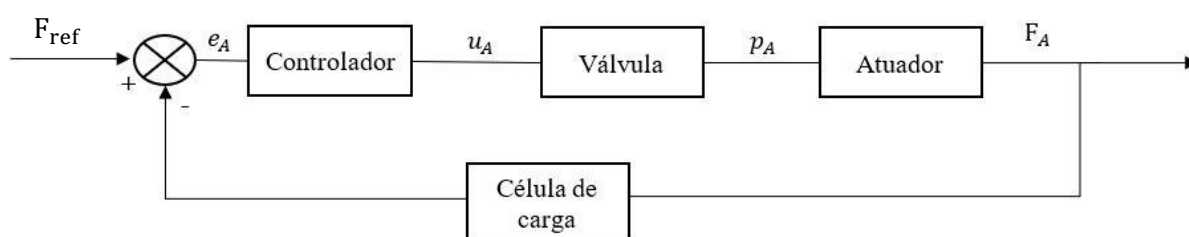


Figura 3.14 - Diagrama de blocos para o controlo de força.

A figura 3.15 é retirada de um catálogo de uma das empresas mais conceituadas no desenvolvimento de válvulas hidráulicas proporcionais, a *Parker*. Neste gráfico pode-se analisar a curva de variação de pressão entre os orifícios A e B dependendo do sinal de comando recebido pela válvula. Como se pode observar, a escala das abcissas apenas abrange 5% da abertura total da gaveta da válvula direcional. No entanto, a partir de 3% de abertura, esta já apresenta saturação nesta relação. O eixo das ordenadas, para esta gama de comando de abertura, abrange até uma variação de pressão entre os dois orifícios de $\pm 100\%$.

É esta discrepância de escalas que torna o controlo em força muito sensível. Qualquer deslocamento mínimo da gaveta, por vezes na ordem de centésimas de milímetro, tem um grande impacto na relação de pressão entre a entrada e a saída do atuador, resultando num aumento repentino da capacidade força, que é dada pela seguinte expressão:

$$F_A = p_A * A_A \quad (3.28)$$

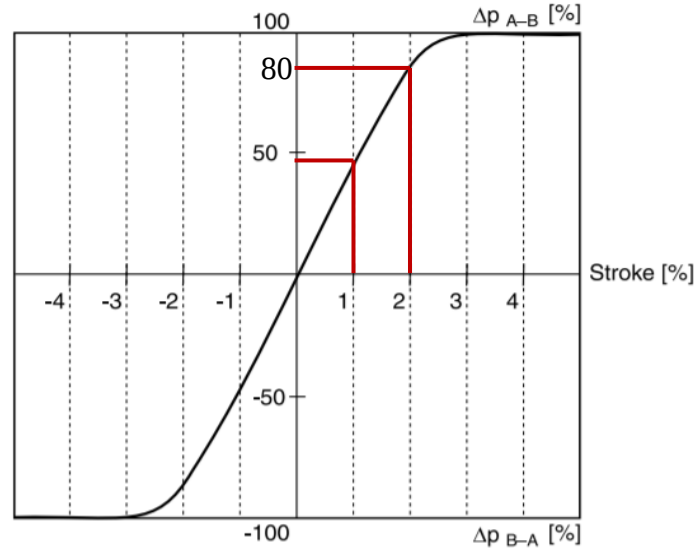


Figura 3.15 - Variação da pressão à entrada e saída do atuador em função do deslocamento da gaveta da válvula direcional proporcional de elevado

De forma ter uma melhor percepção da dificuldade no controlo de força, pode-se notar que para 1% de abertura da válvula, a diferença de pressão entre A e B é, aproximadamente, 50% da pressão disponível na válvula.

$$\frac{\Delta p_{A \rightarrow B}}{p_P} = 50\% \quad (3.29)$$

$$p_A - p_B = 0,5 * p_P \leftrightarrow p_A = 0,5 * p_P + p_B \quad (3.30)$$

Ou seja, para uma pressão constante da fonte, um atuador simétrico e uma válvula proporcional simétrica, caso a pressão em B seja igual a $\frac{1}{4}$ da pressão da fonte, em A a pressão será de $\frac{3}{4}$ da pressão p_P . Isto significa que p_A é 3 vezes maior que p_B .

Se, porventura, o atuador é assimétrico, a relação entre as pressões no atuador e a pressão na fonte depende também da razão de áreas das câmaras do cilindro.

Caso haja possibilidade de ajuste da pressão da fonte para um valor marginalmente superior ao valor da queda de pressão na carga, a relação entre $\Delta p_{A \rightarrow B}$ e p_P aumenta. Esse aumento acompanha a diminuição do declive da reta que é representada na figura 3.15. Desta forma, o controlo da força deixa de ser tão sensível ao comando da válvula.

Quando o atuador atinge a força pretendida, a válvula de elevado desempenho deverá permanecer no valor em que se encontra para que a pressão desejada seja mantida. A manutenção da carga desejada obriga a que o sistema continue a fazer o controlo de força, ajustando consecutivamente a posição da gaveta. Assim, pode-se concluir que, apesar de se considerar o atuador parado, na realidade este continua a oscilar em torno da força desejada.

3.5 Estudo das tecnologias atuais

A análise das várias soluções de unidades energéticas, bem como dos eixos, permite que, a partir deste momento sejam selecionados os componentes elétricos necessários para os diversos

cenários colocados. Contudo, para uma correta seleção desses elementos devem ser tidas algumas considerações acerca do funcionamento dos mesmos. Este processo ajuda a que, posteriormente, se façam opções vantajosas para o desempenho do sistema de ensaios.

Por diversas vezes, neste documento, se mencionou a evolução que os componentes elétricos e informáticos foram sofrendo. Contudo, este tópico ainda não teve o seu merecido destaque. Por este motivo, e uma vez que para a conceção da solução elétrica da máquina é importante conhecer a capacidade dos elementos constituintes, procede-se a um estudo das possibilidades que existem na atualidade para melhorar o controlo, a eficiência energética e a segurança.

3.5.1 Computador vs. Autómato

A entrada na terceira revolução industrial, incentivada por uma perspetiva de automatização dos sistemas industriais, fez as soluções tecnológicas terem evoluções muito diversas. Por volta de 1970 surge o conceito de PLC (*Programmable Logic Controller*) provocando especial atenção a grandes empresas como a *Siemens*, *Omron*, *Allen-Bradley*, entre outras. Rapidamente, este novo componente elétrico atingiu a capacidade de processamento de um computador daquela altura, ao mesmo tempo que resistia às condições adversas dos ambientes funcionais em sistemas industriais.

Com o passar dos anos, o interesse pelo desenvolvimento de computadores pessoais elevou-se e a perspetiva de continuar com o progresso dos PLC's acabou por atenuar. Este renovado interesse depressa resultou num aumento da capacidade dos processadores, incluindo a sua velocidade, redução de tamanho do computador e diminuição dos custos do equipamento. Por estes e muitos outros fatores, as empresas começaram a apostar na inclusão de PC's no controlo de máquinas, dada a sua capacidade de supervisão muito acima de muitos PLC's [18].

Atualmente, a competição já se encontra equilibrada entre os dois componentes e, se muitas das vezes a utilização recai para o uso de um autómato, existem aplicações onde a introdução de um PC não afetaria significativamente a aquisição de dados nem de controlo. Desta forma, dependendo dos objetivos finais, deve-se proceder sempre a uma ponderação dos prós e dos contras [19].

Uma reflexão sobre a utilização de PC's no controlo de máquinas industriais permite visualizar que,

- Não existe nenhum vínculo de ligação com o *hardware* da máquina;
- Apresenta rápida comunicação entre possíveis controladores e equipamentos;
- Suporta mais que uma linguagem de programação, nomeadamente linguagens de programação de alto nível;

Contudo, é possível enumerar algumas desvantagens como,

- Dificuldade ou até mesmo impossibilidade de se proceder às atualizações do sistema operativo;
- Diversidade ao nível das linguagens de programação tornando-se complicado proceder a melhorias, dado que nem todos os engenheiros podem conhecer a linguagem utilizada;
- Durabilidade do processo de suporte à máquina, levando a que o computador que executa o controlo possa ter que suportar diferentes versões do sistema operativo;

Por outro lado, o mesmo exercício de análise pode ser aplicado aos autómatos. Por isso mesmo, podem-se apontar como vantagens,

- Durabilidade, sem qualquer limitação de versão do sistema operativo e extremamente estável em ambientes industriais;
- Manutenção mais fácil quer para eletricistas quer técnicos de controlo, uma vez que a linguagem de programação utilizada é mais familiar e segue a norma IEC 61131-3 standard;
- Fiabilidade, apresentando percentagens muito pequenas de possibilidade de falha;
- *Hardware* desenhado para facilitar a integração nos quadros elétricos das máquinas;
- Dimensões inferiores quando comparado a um computador;

Porém, algumas desvantagens terão que ser destacadas, como,

- Elevado custo de compra imediato;
- Número de entradas e saídas mais limitado do que nos PC's;

É necessário afirmar que, para ambas as soluções aqui analisadas é necessário ter um funcionamento com sistema operativo de tempo-real. Todavia, enquanto os PLC's têm um processador totalmente dedicado à monitorização/controlo, os PC's precisam de alargar a capacidade dos seus processadores para executarem outros programas como o antivírus. Como consequência, a probabilidade de ocorrerem falhas no funcionamento dos computadores pessoais é superior. Relativamente às comunicações, ambos se encontram no mesmo patamar de desenvolvimento, apesar do PLC ter muitas das comunicações como EtherCat, Modbus, CANbus, EtherNET/IP incorporadas e os PC's exigirem a adição de uma nova carta para cada tipo de comunicação [18].

Todavia, para além dos computadores pessoais e dos autómatos, no chão de fábrica são utilizados, muitas vezes, computadores industriais – IPC's. A grande vantagem dos computadores industriais trata-se da versatilidade que estes conseguem alcançar relativamente aos propósitos de utilização. Assim, estes conseguem funcionar tanto como controladores lógicos, como gestores de informação e ainda como interfaces de visualização. Desta forma, os IPC's são vistos por três perspetivas distintas, a do utilizador, a da máquina e a do programador. Para um utilizador, o IPC é equivalente a uma HMI, para a máquina é visto como um autómato e para o programador como se de um PC se tratasse. Deste modo, são reunidas vantagens destes três componentes como o poder de processamento e de memória (RAM), a compreensão de inúmeras linguagens de programação e a facilidade de comunicação com o utilizador.

Por conseguinte, em termos monetários, os computadores industriais representam um gasto inferior quando comparado à soma dos preços individuais de um computador, de um autómato e de uma HMI. Contudo, os IPC's integram sistemas operativos de tempo-real e, por isso, também ficam expostos a vírus informáticos. Tal como nos computadores pessoais, para uma determinada versão de sistema operativo, este pode ficar obsoleto na medida em que deixa de receber *updates* da própria empresa fornecedora, como a *Microsoft* [20].

Como já foi referido em capítulos anteriores, um sistema de ensaios pode ser requerido para aplicações de elevada e/ou baixa dinâmica. A necessidade constante de supervisão, monitorização e correção durante a execução das funções desejadas revela-se indispensável, para os dois tipos de exigências, mas mais crítico para situações de elevada dinâmica. Assim, a utilização de um PLC para efetuar o controlo de sistemas de ensaio, onde falhas de informação podem anular todo o trabalho feito, parece ser a solução mais acertada. Por outro lado, como o autómato é desenhado exclusivamente para ambiente industrial, é inegável que as facilidades destes, como ligações, comunicações, e mesmo a própria estrutura, acabam por sobressair.

3.5.2 Motores elétricos

Outro tema já abordado, neste documento, relativamente às máquinas de ensaio é a necessidade de atendimento da sua eficiência energética. Apesar de já ter sido demonstrado que a utilização de uma bomba com cilindrada variável tem um impacto extremamente positivo no rendimento energético de um sistema, optou-se pela solução variador de velocidade com bomba de cilindrada fixa, pelas razões já apresentadas no ponto 2.7. Porém, um dos problemas dos motores elétricos é o consumo excessivo de corrente no seu arranque. Assim, embora os variadores de velocidade assegurem o arranque controlado do motor muitas vezes, para aplicações simples, também se pretendem soluções mais simples.

Efetivamente, um sistema onde o arranque dos motores seja feito de forma direta implica uma máquina sobredimensionada, visto que os dispositivos são dimensionados de forma a suportar os valores de corrente iniciais. Uma das soluções tradicionais para este problema é a execução de um arranque com os terminais do motor em estrela e, posteriormente, a passagem destes para uma ligação em triângulo. Atualmente, a utilização de arrancadores eletrónicos progressivos (*soft starter*) e de variadores de frequência no comando de motores acaba por atenuar estes problemas, nomeadamente a grande limitação do número de arranques por unidade de tempo. A grande divergência entre a aplicação de um arrancador eletrónico progressivo e de um variador é a incapacidade, por parte do *soft starter*, em controlar a velocidade do motor durante todo o seu funcionamento.

Para uma melhor compreensão das várias soluções que hoje em dia se utilizam, proceder-se-á a uma descrição mais detalhada das vantagens e desvantagens do arranque em estrela-triângulo, da utilização de um *soft starter* ou da utilização de um variador de frequência. A figura 3.16 estabelece uma relação entre percentagem de velocidade e percentagem de corrente para cada tipo de tecnologia associada ao circuito.

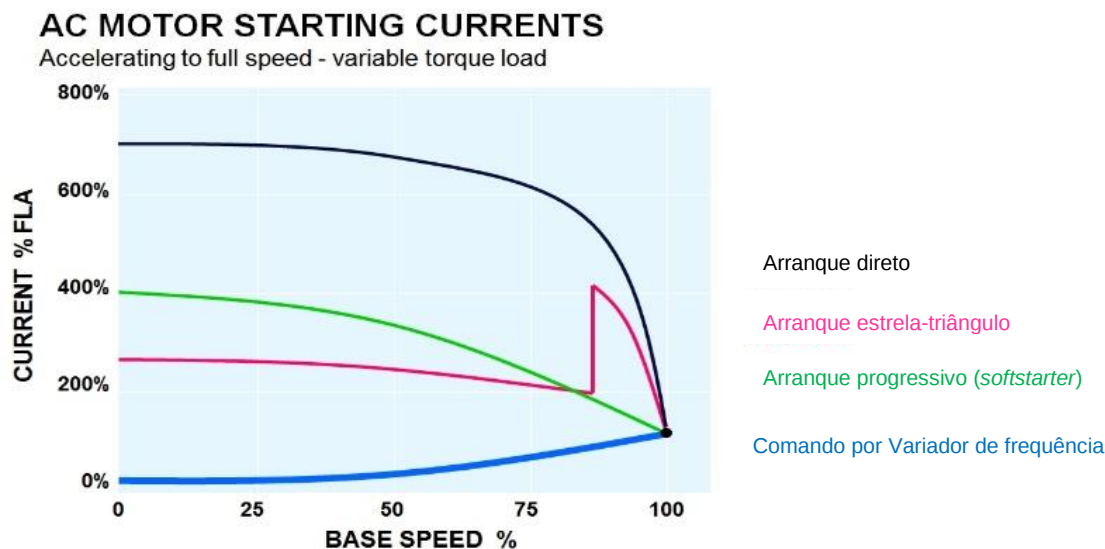


Figura 3.16 - Gráfico corrente/velocidade para arranque direto, arranque em estrela-triângulo, arranque com *soft starter* e arranque com variador de velocidade [21].

- Arranque em estrela-triângulo

Este método inicia-se com os enrolamentos ligados em estrela, o que permite a redução em $\sqrt{3}$ da corrente que seria necessária num arranque em triângulo, uma vez que a tensão aplicada aos enrolamentos é diminuída nessa proporção. O mesmo acontece com o binário disponível no arranque. Apesar da diminuição de corrente ser um ponto a favor deste procedimento, porque não exige que o sistema seja sobredimensionado dada a corrente máxima, a redução do binário pode resultar num inconveniente para muitas aplicações. Como este procedimento apenas depende das ligações feitas ao motor, apresenta custo reduzido. Contudo, por vezes, podem ocorrer problemas na transição de estrela para triângulo, como picos de corrente que disparam a proteção térmica [21].

- Soft Starter

O uso de *soft starters* é muito frequente, atualmente. Este componente permite a definição de rampas no arranque e na paragem para que o motor nunca seja exposto a valores de corrente elevados, nem a variações repentinas de corrente e de binário. Por outro lado, verifica-se uma melhoria na eficiência energética de todo o sistema. Caso a aplicação em causa exija um *start* e um *stop* do motor frequentes, então não se chega a ponderar o arranque em estrela-triângulo. Comparativamente a um variador de velocidade, os *soft starters* são soluções mais económicas e com necessidade de menor espaço para a sua instalação. Desta forma, se as exigências do sistema apenas implicarem o controlo do arranque e da paragem do motor, então a utilização deste componente é mais interessante [21, 22].

- Variador de Velocidade

Um variador de velocidade (VSD ou VFD) consiste em duas partes, a conversão de AC (50/60 Hz) para DC e, posteriormente, de DC para AC, mas numa frequência variável entre 0-250 Hz. Desta forma, a variação controlada da frequência tem como consequência o controlo da velocidade do motor [22].

Através do VSD consegue-se obter um controlo contínuo da velocidade do motor. Regista-se também uma suavização quer do arranque, quer da paragem e uma diminuição dos choques mecânicos, tal como no *soft starter*.

A colocação do variador de velocidade é interessante para aplicações de maior potência. Dessa forma, as rotações do motor são constantemente adaptadas às imposições do sistema, evitando que a maioria do caudal seja enviado para o reservatório. Pode-se ainda acrescentar uma redução dos choques mecânicos nas rampas de aceleração/desaceleração e uma melhor utilização das características do motor. Contudo, as grandes desvantagens do variador de velocidade são o seu custo e o espaço ocupado no armário elétrico [23].

Em situações pouco rigorosas onde apenas seja necessário trabalhar com caudal ligeiramente acima do que é pedido, o variador de velocidade pode funcionar em malha aberta. Porém, para situações que exijam um controlo mais rigoroso da velocidade de rotação do motor, a utilização de um taquímetro no motor ou no atuador, permite que o controlo seja feito em malha fechada.

Depois de analisadas estas metodologias, e tendo em consideração o objetivo final, o desenvolvimento de propostas com *soft starter* ou com variador de velocidade são as mais interessantes. Se por um lado, o *soft starter* é vantajoso em aplicações cujo problema se centra no arranque e na paragem, a colocação de um variador acabaria por ser desnecessária, uma vez que não se utilizariam muitas das capacidades do mesmo. Mas, como se perspetiva uma solução mais abrangente, a possibilidade de inclusão de um variador de velocidade também deve ser considerada pois o retorno económico do investimento pode ser rapidamente assegurado.

3.5.3 Segurança

Em termos de segurança, presentemente, o não cumprimento das normas ditadas pela Diretiva Máquinas pode levar à não aprovação de uma máquina em termos de conformidade com a Diretiva aplicável, não admitindo a marcação CE [24]. Assim sendo, assumindo uma perspetiva de segurança, qualquer fonte de alimentação, motor e tomada de energia devem ser protegidos por um disjuntor magneto-térmico.

Atualmente, praticamente nenhum mecanismo deve funcionar sem botões de emergência, relés de segurança e sinalização como, por exemplo, *buzzer* e sinais luminosos. A aplicação de um relé eletromecânico a exercer funções de um relé de segurança não é possível dada a sua configuração física. Um uso repetido dos mesmos pode levar à fusão dos seus contactos. Caso isso aconteça, apesar do operador pressionar o botão de emergência, o sistema não é impedido de funcionar, trazendo riscos para quem manuseia a máquina. Por esta razão, as normas de segurança europeias impedem a utilização de relés e disjuntores simples para executar uma função de segurança nomeadamente em Máquinas Perigosas [25].

Em termos de funcionalidade, a implementação de relés de segurança, para além da monitorização constante de eventuais falhas, garante, por exemplo, uma paragem controlada e segura de um movimento inseguro e uma interrupção imediata da atividade da máquina caso alguma anomalia seja detetada. Cada vez mais, a ambição da indústria se torna desmedida e as informações de diagnóstico extremamente importantes. Neste sentido, um relé de segurança com interface de comunicação tem vindo a ganhar protagonismo [25].

Em termos construtivos, os relés aqui abordados apresentam, normalmente, três disjuntores associados, o que impede falhas no sistema de segurança. Este dispositivo é construído com o intuito de identificar erros no circuito de entrada, tal como a fusão de um dos contactos do botão de emergência ou do próprio relé [25]. Por fim, mas não menos importante, o rearme é apenas assegurado em condição de segurança ditada pelo autómato.

3.6 Desenvolvimento da solução elétrica - seleção de componentes

Como foi dito anteriormente, o aprimoramento dos sistemas de ensaio flexíveis passaria por reajustar as tecnologias envolvidas. Essa alteração acaba por implicar várias reestruturações, essencialmente elétricas e de *software*. Nos tópicos 3.2 e 3.3, já foram descritas todas as propostas de soluções para os eixos e unidades energéticas.

Tendo em conta a descrição feita sobre os arranques dos motores elétricos, optou-se por não considerar o arranque do motor trifásico por uma solução com arranque estrela-triângulo optando-se pela utilização de um *soft starter* ou de um variador de velocidade, dependendo das aplicações. Desta forma, não só se progride em termos de eficiência energética do sistema como

em termos de solução tecnológica. A aplicação de um dos dois dispositivos em substituição do arranque estrela-triângulo melhora o controle no arranque e na paragem do motor e a diminuição da corrente atingida na fase inicial e, conseqüentemente, a redução da tensão exigida ao sistema. O variador, adicionalmente, ainda permite o ajuste contínuo da tensão às necessidades da máquina. Por outro lado, a integração de um *soft starter* ou de um variador de frequência permitirá, igualmente, uma evolução ao nível das comunicações e da supervisão do seu funcionamento. Assim, a sua implementação concederá a oportunidade para se desenvolver um diálogo entre os vários componentes da máquina, através de protocolos de comunicação, como *Ethernet/IP*, não fazendo depender o funcionamento do sistema apenas de soluções cabladas.

A segunda alteração diz respeito à segurança e às normas que vigoram, nos dias de hoje. Portanto, é essencial contar com a existência de pelo menos um botão de emergência, assim como de um relé de segurança.

Por último, proceder-se-á à integração de um autômato no armário elétrico. Anteriormente, já foi mencionado que a utilização de um computador incorporado com cartas de aquisição para uma monitorização constante dos ensaios encontra-se a um nível inferior quando comparado a um autômato, desenvolvido apenas para essa função. Desta forma, parece bastante adequado proceder a esta alteração. A escolha do mesmo é descrita no próximo subcapítulo.

3.6.1 Autômato

É proposta a alteração do cérebro desta família de sistemas de ensaio. Comparativamente aos restantes dispositivos que farão parte do armário desenvolvido, a escolha do autômato deve ser a primeira etapa na elaboração do *layout*, uma vez que as suas características ditam a capacidade de monitorização e controle que será permitida. Assim, os próximos pontos abordam a escolha e caracterização tanto do autômato como dos módulos de expansão que devem ser incorporados. Para o sistema de ensaios flexível desenvolvido neste estudo, propõe-se a implementação do autômato de última geração *Logic/motion controller – Modicon M262*, da *Schneider*. Este controlador apresenta várias características que o fazem sobressair dos restantes controladores lançados pela mesma empresa. É de notar o seu *design* flexível que permite a adição de módulos para entradas/saídas digitais e analógicas e módulos que permitem distribuir essas variáveis em redes de comunicação *Ethernet*, *CANopen* e *Modbus Serial Line* [26].

Em termos de *performance*, o controlador *Modicon M262* apresenta um processador *dual-core*. Por um lado, o core 1 é utilizado na gestão das tarefas de comando e monitorização e, ainda, assegura a execução das mesmas em tempo-real. Por outro lado, o core 2 é responsável pela execução das tarefas de comunicação, não tendo qualquer impacto na *performance* de execução do código programado. Relativamente à leitura das instruções, esta é feita a cada 5 nanossegundos, processo muito mais rápido comparativamente a outros autômatos da *Schneider*. Pode-se ainda apontar para uma capacidade de armazenamento de informação de 256 MB de memória RAM e de 1 GB de memória flash utilizada para o backup da informação da aplicação [26].

Fisicamente, este controlador inclui, na sua unidade base, 4 entradas rápidas que podem ser utilizadas, por exemplo, para leitura de um *encoder* de um transdutor de posição e 4 saídas rápidas de transístor. Todas assinaladas por LEDs. Caso a aplicação em causa exija a monitorização de dois eixos, então teria de ser aplicado um novo módulo de entradas rápidas para a medição do deslocamento. De sublinhar que ainda se pode contar com uma entrada RJ45

da *Ethernet 1* permitindo a ligação, por exemplo a base de dados, e duas entradas *Ethernet 2* para que seja estabelecida a comunicação aos restantes componentes do circuito comandado que também suportem *Ethernet*.

3.6.2 Módulos de expansão

Os módulos de expansão escolhidos para se associarem ao autómato Modicon M262 pertencem à gama TM3 da *Schneider*. Devido aos vários requisitos do sistema de ensaio e todas as suas possíveis configurações, foi selecionado um módulo de entradas digitais, um módulo de saídas digitais por transístor, dois módulos de entradas analógicas e um módulo de saídas analógicas. Esta opção apenas é necessária para a máxima utilização da máquina, ou seja, monitorização simultânea de dois eixos e central hidráulica tipo II ou tipo III. Contudo, a família TM3 apresenta uma grande variedade, pelo que a seleção foi feita, também, de acordo com o custo dos mesmos. Os módulos de entrada e saída digitais contêm uma ficha HE10 que, de certa forma, facilita a ligação entre os componentes do sistema e os módulos, deixando o armário com uma aparência mais organizada.

Existe, ainda, a possibilidade de se optar por módulos com saídas por relé que proporcionam uma proteção galvânica, ou seja, maior segurança na abertura e fecho dos contactos. Contudo, as saídas por transístor, apesar de não alcançarem os 100% de fiabilidade como as saídas por relé, mas apenas 99.9%, apresentam um custo inferior. Como, por princípio, se colocam relés exteriormente, preferiram-se os módulos com saídas por transístor. Pode-se ainda salientar que o tempo de resposta de um relé (10 ms) é muito superior ao de um transístor (1ms).

Na tabela 3.8 é feita a correspondência entre os módulos de expansão e as combinações que o sistema pode adquirir fisicamente.

Tabela 3.8 - Módulos de expansão I/O para diferentes configurações do sistema de ensaio.

Número de eixos	Central hidráulica	Constituição	Preço final
2	Tipo II/Tipo III	- Módulo de 16 entrada digitais - TM3DI16K - Módulo de 16 saídas digitais por transístor NPN - TM3DQ16UK - Módulo de 8 entradas analógicas - TM3AI8 - Módulo de 4 entradas analógicas - TM3AI4 - Módulo de 4 saídas analógicas - TM3AQ4	715.64 €
2	Tipo I	- Módulo de 16 entrada digitais - TM3DI16K - Módulo de 16 saídas digitais por transístor NPN - TM3DQ16UK - Módulo de 8 entradas analógicas - TM3AI8 - Módulo de 4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas - TM3AM6	586.68 €
1	Tipo II/Tipo III	- Módulo de 16 entrada digitais - TM3DI16K - Módulo de 8 saídas digitais por transístor NPN - TM3DQ8U - Módulo de 8 entradas analógicas - TM3AI8 - Módulo de 4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas - TM3AM6	575.94 €
1	Tipo I	- Módulo de 16 entrada digitais - TM3DI16K - Módulo de 8 saídas digitais por transístor NPN - TM3DQ8U - Módulo de 4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas - TM3AM6	388.94 €

Outro componente usado neste sistema de ensaio é o módulo de expansão *Ethernet* – TMSES24. Apenas é permitido um máximo de três acoplamentos deste. A taxa de transferência de informação através do TMSES24 pode alcançar até 1 Gbit/s pela entrada *Ethernet 2*, no

entanto, o módulo adapta-se à velocidade de receção dos outros componentes com quem estabelece comunicação. Por este motivo, este elemento é considerado inteligente. Outra vantagem desta expansão é a capacidade que tem de se ligar ao autómato através de um conector bus situado na lateral do mesmo. Assim, são aproveitadas três entradas RJ45 e não apenas duas como acontece nas versões mais antigas de controladores [27]. Este módulo tem ainda um sistema de monitorização a cada segundo para verificar se o cabo de ligação *Ethernet* está conectado corretamente. No entanto, se o tempo de desconexão for inferior a um segundo, pode não ser detetada.

Por fim, é importante salientar que, em termos de montagem, os módulos de expansão I/O devem ser colocados do lado direito do autómato, e os módulos *Ethernet* do lado esquerdo.

3.6.3 Fontes de alimentação

A seleção das fontes de alimentação, tanto de potência como de sinal, resultaram da verificação da corrente necessária para os vários componentes alimentados por estas. Conclui-se que a fonte de alimentação de sinal é responsável pelo fornecimento de energia a todos os transdutores, sensores, e botões de emergência. Cada componente consome cerca de 20mA. Por isso, para a utilização máxima do sistema serão necessários:

- 2 transdutores de posição;
- 2 células de carga;
- 4 transdutores auxiliares;
- 1 Sensor de Nível;
- 1 Sensor de filtro;
- 1 transdutor de pressão;
- 1 transdutor de temperatura;
- 1 botão de emergência.

Optou-se por uma fonte de alimentação de sinal de 3A, garantindo, portanto, uma margem de manobra para eventuais necessidades como consumo de corrente para comutação dos contactos das sub-bases e alimentação do autómato e módulos de expansão. Por outro lado, trata-se da fonte de alimentação com potência mais baixa da empresa Schneider capaz de fazer ligações monofásicas e ligações entre fases com uma eficiência bastante superior face às fontes de alimentação com potências ainda mais reduzidas, mas que apenas cobrem ligações monofásicas.

Relativamente à fonte de potência, o sistema na sua máxima capacidade exige 2 válvulas de elevado desempenho a consumir 3A, quatro válvulas auxiliares com 1,5A de necessidade, uma válvula de descarga a consumir 1A, uma válvula limitadora de pressão proporcional de 3A e um relé de segurança a consumir 3A. Assim, será necessário a utilização de uma fonte de alimentação de 20A. Contudo, como muitas das aplicações não utilizam a máxima capacidade propõe-se usar-se uma fonte de 10A e, caso seja necessário, futuramente, acrescentar outra fonte de 10A.

3.6.4 Disjuntores

Em termos de dispositivos de proteção, optou-se por se utilizar disjuntores magneto-térmicos. Os disjuntores são constituídos por um interruptor de acionamento manual (biestável). Os seus contactos quando expostos a sobrecarga (proteção térmica) ou curto-circuitos (proteção magnética) abrem o circuito. Posteriormente, estes podem ser rearmados. É ainda de sublinhar

que estes componentes não são utilizados apenas nas ligações ao motor, mas também a tomadas monofásicas e fontes de alimentação. Assim, todos os movimentos do sistema são suspensos quando os contactos dos disjuntores disparam [28].

A seleção dos disjuntores depende da corrente do circuito onde são inseridos. O cálculo da corrente é então dado pela expressão,

$$P = VI \quad (3.31)$$

Em que P é a potência da fonte de alimentação e V a tensão entre fases.

Assim, o disjuntor para a fonte de alimentação está exposto a 72W e 220VAC pelo que apenas necessita de 0.33A. Relativamente ao disjuntor da fonte de potência, este necessita de 1.1A, uma vez que se encontra na presença de uma potência igual a 240W e uma tensão de 220VAC.

Por fim, a escolha do disjuntor para o motor recaiu na capacidade deste em cortar o circuito para um motor de 1,5 kW a 400/415 V AC e 50/60Hz. Para apoiar esta escolha, a própria empresa *Schneider* desenvolveu um catálogo com compatibilidades entre o contactor e o disjuntor para o motor.

3.6.5 Contactor

O contactor é, maioritariamente, utilizado para comando de motores. Desta forma, deve ter a capacidade para estabelecer, suportar e interromper a corrente que circula pelo circuito, em condições normais de trabalho. No entanto, este deve estar dimensionado para suportar sobrecarga que, geralmente, ocorre no arranque. É constituído por um conjunto de contactos eléctricos (principais e auxiliares) atuados electromagneticamente por meio de solenoide [28].

Os fatores de escolha do contactor ideal para esta solução foram: o número e o tipo de contactos e a potência do motor suportada. Assim, optou-se por um contactor trifásico com três contactos normalmente abertos e que suporta um motor com 1,5kW de potência (valor estipulado para este estudo).

3.6.6 Relé de segurança

A seleção do relé de segurança foi um dos processos facilitados pela grande informação fornecida nos catálogos da empresa *Schneider*. Perante a seleção do autómato adequado para desempenhar as funções pretendidas, a empresa organizou um documento informativo para indicar alguma das compatibilidades desse autómato com os restantes componentes. Assim, dentro da família de relés de segurança compatíveis apenas foi necessário escolher o que desempenhava os objetivos pretendidos para o circuito. Optou-se, portanto, por um relé de segurança alimentado a 24V DC ou 24V AC que garante a monitorização de botões de emergência, interruptores magnéticos, sensores de proximidade de segurança, sensores com saída PNP, equipamentos com proteção electro sensível e barreiras de luz de segurança. Por outro lado, o relé selecionado fornece, continuamente, diagnósticos com informação completa dos diferentes estados da máquina, agilizando todo o processo de manutenção.

3.6.7 Variador de velocidade

A seleção do variador de velocidade adequado passa por conhecer a compatibilidade deste com o autómato selecionado. Mais uma vez, a Schneider indica, para o autómato Modicon M262, quais são as famílias de variadores que conseguem estabelecer ligação com este. São indicadas duas possibilidades, a família Altivar ATV340 e a família Altivar ATV320. A primeira opção é utilizada sobretudo em situações com potência elevada, o que não é o caso.

Depois de decidida qual a família mais apropriada é fundamental encontrar um variador que permita trabalhar à potência do motor e que tenha a possibilidade de se ligar a todas as fases deste.

3.6.8 *Soft Starter*

Na seleção deste componente elétrico optou-se por um *soft starter* que não abrangesse comunicação via *Ethernet/IP*. De facto, como a solução aqui desenvolvida compreende um motor de baixa potência, $\leq 1,5\text{kW}$, a troca de informação reduz-se ao envio do sinal de ligar e desligar o arrancador e realizar a monitorização deste. Para aplicações com maior potência e mais exigências, a utilização de um *soft starter* é abandonada e opta-se por aplicar um variador de velocidade. Desta maneira, faz sentido que o variador consiga estabelecer comunicação com o autómato segundo o protocolo de *Ethernet/IP*.

Para a escolha do arrancador elétrico é imperioso conhecer a potência do motor e se este pode ou não ser ligado a um motor trifásico. Por outro lado, existem *soft starter* que autorizam apenas o ajuste do tempo de arranque e tensão inicial, mas também existem aqueles que permitem o acerto do tempo de arranque, da tensão inicial e do tempo de paragem. De forma a garantir uma maior vida útil dos componentes para o sistema de ensaio, optou-se por um *soft starter* que possibilite, também, uma paragem gradual.

3.6.9 UPS

Num ambiente industrial, falhas de energia ou distúrbios na fonte de alimentação podem comprometer o funcionamento de equipamentos e representar riscos para o operador, uma vez que todo o processo é interrompido e, por vezes, desligado, fazendo com que a etapa em curso do procedimento do mecanismo seja perdida. Assim, no momento de reiniciar o sistema, este pode não conseguir garantir a segurança necessária. De forma a contornar possíveis perdas económicas e eventuais perigos para o operador, é importante manter a alimentação de todo o sistema de comando, independentemente da rede elétrica. Neste contexto, surgem as UPS (*Uninterruptible Power Supply*) cuja principal função é a proteção de fontes de energia elétrica para as instalações industriais que não tolerem qualquer interrupção ou inconsistência de tensão. Por outro lado, a energia elétrica fornecida pode não ter sido filtrada e apresentar, por isso, harmónicos, quedas, picos ou outros ruídos. A colocação de uma ou mais UPS ao longo do sistema permite uma filtragem eficaz da energia [29].

Embora a colocação de uma UPS não tenha sido considerada para este sistema de ensaios flexível, uma posterior utilização poderá ser uma hipótese interessante. Na verdade, para ensaios de longa duração é aconselhável a instalação de uma UPS evitando, dessa forma, a interrupção ou até mesmo a paragem definitiva desses ensaios, por falhas na alimentação. Por

consequente, com esta solução, a empresa tem menor probabilidade de desperdiçar tempo e dinheiro, desnecessariamente.

3.7 Esquemas elétricos

O desenvolvimento do circuito elétrico, após conhecidos todos os requisitos que deveriam ser tidos em consideração e quais as alterações a executar, foi feito através do *software Solidworks Electrical*.

No anexo A encontram-se os esquemas elétricos desenvolvidos, incluindo as ligações estabelecidas entre o quadro elétrico, a unidade energética e os eixos utilizados. Estas ligações são efetuadas por fios que transportam o sinal e que, por sua vez, são agrupados em cabos deixando o ambiente industrial mais organizado. Contudo, quer os cabos quer os fios devem ser identificados por números e cores, respetivamente. Isto permite que, de uma forma mais fácil, os operadores de manutenção consigam identificar a função de cada fio. Este procedimento permite agilizar o processo de compreensão e, posteriormente, de correção de eventuais erros.

A parte elétrica de comando envolve todos os componentes que permitam ao autómato receber informação e atuar sobre outros elementos.

A parte de potência compreende a ligação trifásica à rede industrial e é utilizada para a alimentação de motores, de válvulas, de fontes de alimentação, de relés de segurança, seccionadores, interruptores, fusíveis, entre outros. É sempre boa prática separar a parte de sinal da parte de potência, uma vez que esta facilmente necessita de elevadas correntes que provocam o aquecimento dos seus componentes, como variadores de velocidade e fontes de potência. O aumento da temperatura interfere com a monitorização e comando por parte do autómato.

Alterando o foco deste estudo para a elaboração do esquema elétrico, este segue uma ordem característica. Primeiramente, procede-se à esquematização dos elementos de potência. Seguidamente, às ligações internas e transdutores da central hidráulica e, por fim, às ligações ao autómato.

A alimentação do quadro é feita através de uma tomada trifásica e não por interruptor-seccionador. A vantagem em recorrer a um interruptor-seccionador diz respeito à segurança, ou seja, não permite ao operador aceder ao quadro sem desligar a alimentação do mesmo. Contudo, como o sistema aqui em estudo apresenta valores de potência reduzidos e acreditando que o operador de manutenção desligará a alimentação do quadro, preferiu-se salvaguardar o espaço que seria ocupado pelo seccionador para outros componentes.

No processo de desenvolvimento dos esquemas, nem todos os componentes podem ser representados por um símbolo normalizado, como é o caso dos módulos de expansão do autómato, *soft starter*, variador de velocidade, sub-bases, relés de segurança, entre outros. Porém, os fabricantes disponibilizam nos catálogos dos elementos a cablagem dos mesmos, para que, desta forma, não se criem confusões nas ligações e tornem todo o processo menos moroso.

De notar que se entendeu ser uma melhor solução a colocação de caixas concentradoras de sinal nos eixos. Estas caixas são constituídas somente por bornes que recebem os sinais vindos do quadro de comando e, posteriormente, enviam estes sinais aos respetivos recetores. Mais uma

vez, esta prática permite que o ambiente industrial fique mais organizado. Assim, fios, por vezes com $0,25\text{mm}^2$ de secção, são agrupados em cabos mais resistentes, envolvidos numa malha de metal também para proteção contra ruído eletromagnético.

Propõe-se, por fim, a utilização de sub-bases de ligação, em substituição de alguns bornes. Este procedimento foi tido em consideração nos bornes que, posteriormente, fariam a conexão com os módulos de entrada e saídas digitais do autómato. Assim, será dispensada a necessidade de ligar um fio de cada vez ao módulo do autómato, o que por vezes se revela numa tarefa com pouca fiabilidade, e serão utilizadas fichas HE10. A partir das sub-bases de ligação os sinais são conduzidos através de *flat cables*, proporcionando uma melhor organização visual do próprio quadro elétrico.

3.8 Quadro elétrico

Depois de escolhidos todos os componentes necessários, procede-se à organização do *layout* do quadro elétrico. Isto trata-se de um complemento aos circuitos elétricos do anexo A, facilitando a construção dos armários. Elaborar um esboço de como deverão ser distribuídos os componentes pelos quadros elétricos permite, em primeiro lugar, cumprir as regras que serão expostas a seguir e, em segundo lugar, ter ideia das dimensões necessárias para o armário e, assim, proceder à encomenda do mesmo.

Na tabela 3.9 agruparam-se todos os componentes selecionados para esta aplicação, indicando a respetiva referência da marca, as dimensões, o preço por unidade e a quantidade.

Tabela 3.9 - Características dos componentes selecionados para o quadro elétrico.

Componente	Referência	Dimensões mm (AxLxP)	Preço/unid (€)	Quant.	Preço (€)
Contactador	LC1D09BL	77 x 45 x 95	60,29	1	60,29
Disjuntor motor	GV2ME08	89 x 45x 78,5	78,02	1	78,02
Disjuntor FAP	GB2CD07	74 x 15 x 67	39,4	1	39,4
Disjuntor FAI	GB2CD05	74 x 15 x 67	39,4	1	39,4
Disjuntor Tomada	GB2CD12	74 x 15 x 67	39,81	1	39,81
<i>Soft starter</i>	ATS01N209LU	124 x 45 x 131	236,17	1	236,17
Relé de Segurança	XPSUAF13AP	100 x 22,5 x 120	146,6	1	146,6
Relé Auxiliar. Segurança 2 polos	P2RF_08_PU/G2R_2_SND	-	-	-	-
Módulo 16 ID	TM3DI16K	90 x 21,4 x 81,3	94,57	1	94,57
Módulo 16 OD	TM3DQ16UK	90 x 21,4 x 81,3	94,47	1	94,47
Módulo 8 IA	TM3AI8	90 x 23,6 x 70	187	1	187

Módulo 4 IA	TM3AI4	90 x 23,6 x 70	152,6	1	152,6
Módulo 4 AO	TM3AQ4	90 x 23,6 x 70	187	1	187
Módulo p/ ligação ao PLC	ABEH16R21	125 largura	132,37	1	132,37
Módulo p/ ligação ao PLC	ABE7R16S111	125 largura	290,52	1	290,52
Tomada monofásica	81478	-	-	-	-
Relé Válvula descarga 1 polo	P2RF-05-PU/G2R-1-SND	-	-	-	-
Relé motor 2 polos	P2RF_08_PU/G2R_2_SND	-	-	-	-
Fonte de potência 24 VDC 10A	ABL8RPS24100	125 x 86 x 145	257	1	257
Fonte de alim. digital 24VDC 3A	ABL8RPS24030	125 x 45 x 125	193	1	193
Fonte de potência 24 VDC 20A	ABL8RPM24200	125 x 146 x 145	406	1	406
Autômato	TM262L10MESE8T	100 x 125 x 90	770	1	770
Módulo <i>Ethernet</i>	TMS4S4	100 x 60 x 88.3	386	1	386
Interruptor geral	GV2APN04	-	59,27	1	59,27
Interruptor geral	GV2P08	89 x 45x 97	102,26	1	102,26
<i>Access Point</i>	-	-	-	-	-
Variador de velocidade 1,5kW	ATV320U15M3C	143 x 105 x 138	410,95	1	410,95
Armário	NSYS3D6620P	600 x 600 x 200	-	-	-
Tomada Trifásica macho 3P+N+E	81709	-	-	-	-
Bornes 6 mm ²	NSYTRV62	-	1,26	3	3,78
Bornes 6 mm ² PE	NSYTRV62PE	-	3,75	1	3,75
Bornes 2,5mm ² duplos	NSYTRV24D	-	2,45	22	53,9

3.8.1 Regras de construção

Nesta secção do documento são descritas algumas atenções que devem ser consideradas na elaboração/dimensionamento de um quadro elétrico, para o correto funcionamento do mesmo. O seguimento destas regras ajuda na compreensão, *à priori*, de como deve ser construído o

quadro elétrico, evitando, por isso, problemas de sobreaquecimento dos equipamentos e perturbações de ruído entre os mesmos, por exemplo.

Seguindo um ponto de vista mais metódico para o desenvolvimento do quadro elétrico, são apresentados os seguintes essenciais na estruturação dos mesmos:

1. Discussão dos requisitos do sistema de ensaio de acordo com a aplicação pretendida;
2. Seleção dos componentes elétricos necessários a essa determinada aplicação;
3. Não esquecer os componentes relativos à segurança;
4. Colocação dos equipamentos segundo posições aconselhadas nos catálogos dos mesmos;
5. Dimensionamento do armário elétrico tendo em atenção as dimensões dos vários componentes e respetivas distâncias mínimas para que seja evitado o sobreaquecimento dos mesmos;
6. Componentes alimentados a 24VDC de potência, geralmente, são colocados do lado direito do quadro e os componentes que recorrem a 24VDC de sinal no lado esquerdo, pois os cabos de comunicação não se devem cruzar com os cabos de potência;
7. Deixar sempre espaço disponível para futuras expansões e para facilitar as manutenções;
8. Se possível, colocar os componentes com maior tendência de aquecimento na parte superior do armário e nunca alinhados na mesma coluna, dado que o ar quente tem tendência a subir;
9. Agrupar os condutores inserindo-os em horizontais ou verticais, garantindo uma melhor organização do armário;
10. Agrupar os condutores inserindo-os em calhas horizontais ou verticais, garantindo uma melhor organização do armário;
11. Respeitar as cores normalizadas utilizadas para a identificação dos fios com o objetivo de facilitar a montagem do circuito (circuito de comando e circuito de alimentação de entradas) e diferenciar condutores com polaridades distintas.

De forma a concluir este ponto de vista, a montagem de um quadro elétrico deve ter em atenção problemas de aquecimento, espaço disponível, entradas e saídas de cabos e influências/perturbações criadas entre componentes. Por conseguinte, o desenvolvimento de um *layout* através de aplicações de *software* disponíveis para esse fim revela-se oportunamente interessante, na medida em que facilita a posterior construção do mesmo, respeitando desde o início todos os pontos referidos anteriormente. Assim, o risco de um incorreto funcionamento dos equipamentos é bastante reduzido [30, 31]. De sublinhar que os três primeiros pontos da lista anterior já foram desenvolvidos neste documento.

3.8.2 Layout

Na imagem que se segue, figura 3.17, apresentam-se as diferentes categorias de produtos que, habitualmente, fazem parte dos quadros elétricos de uma máquina.

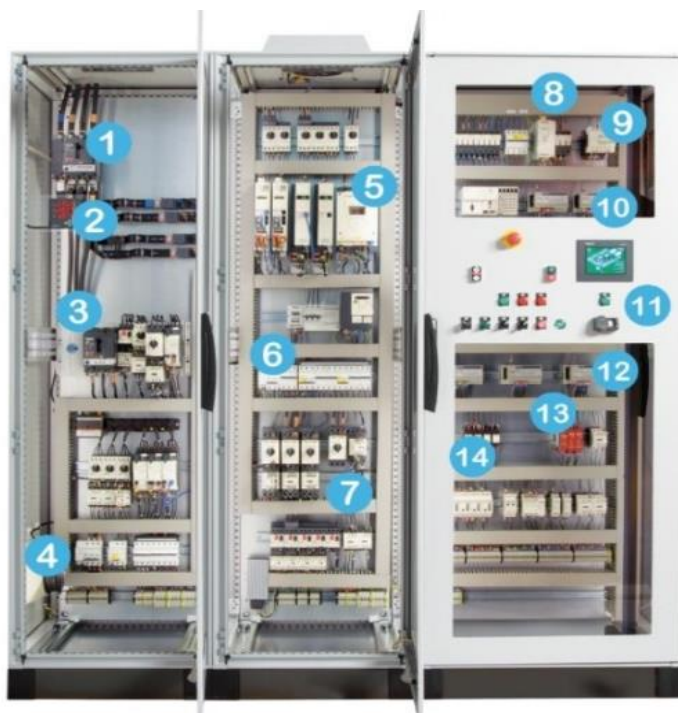


Figura 3.17 – Famílias de componentes que, habitualmente, constituem um armário elétrico.

Tabela 3.10 - Indicação das famílias de componentes assinaladas na figura 3.17.

Número	Descrição
1	Proteção de entrada e comutação
2	Controlo e monitorização de potência e energia
3	Sistema de distribuição de energia
4	Gestão térmica
5	Acionamento e movimento
6	Circuito e proteção de carga
7	Controlo do motor
8	Calhas de cabo
9	Fontes de alimentação e transformadores
10	Controladores programáveis
11	Diálogo com o operador
12	Interface de entradas/saídas
13	Segurança da máquina
14	Relés

Sabendo que as potências de trabalho deste sistema não são elevadas (motor com potência $\leq 1,5\text{kW}$), propõe-se a junção do quadro elétrico de sinal, utilizado no comando e monitorização com o quadro elétrico de potência utilizado para alimentação da central hidráulica.

Na figura 3.18 é apresentado o *layout* para uma configuração do sistema que apenas exige uma fonte de alimentação de potência de 10A e um *soft starter*.

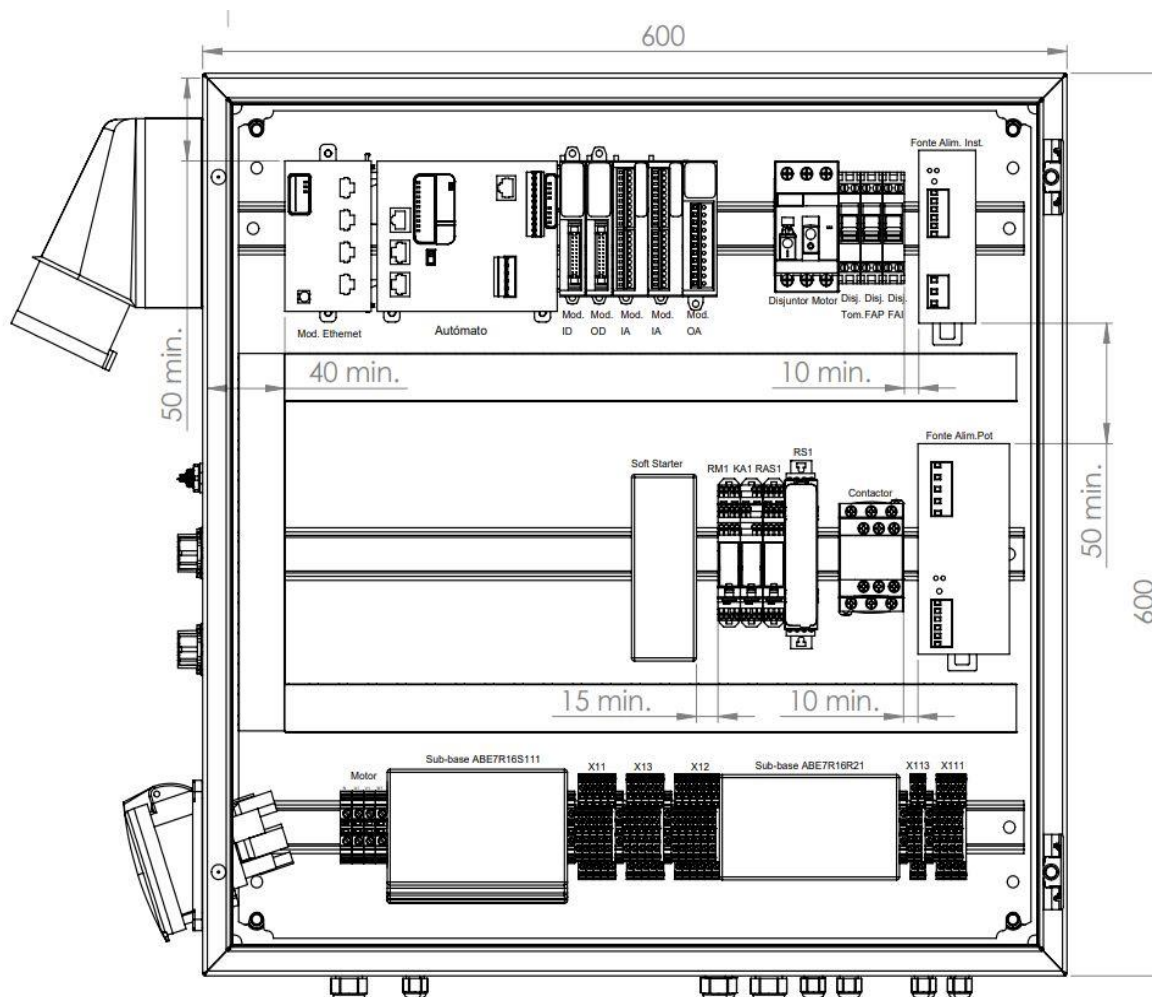


Figura 3.18 - Layout do quadro elétrico de comando.

Como se pode observar, na base do armário estão dispostos tanto os bornes como as sub-bases. Estas sub-bases agilizam todo o processo de ligação dos fios para as monitorizações e os comandos ao PLC, reunindo estes num *flat cable*, como já foi explicado neste documento, na secção 3.7. Além disso, a colocação destes componentes na parte inferior aproxima-os das entradas dos cabos provenientes de outros armários - assinalados pelos bucins. Na parte superior colocou-se o autômato com os seus módulos de expansão. De notar que o PLC se encontra distante das fontes de alimentação que sofrem, muitas das vezes, de aquecimento.

O armário, com dimensões 600x600x200mm, concede flexibilidade a outras aplicações. Caso o sistema de ensaio exija a colocação de um variador de velocidade e necessite de duas fontes de potência de 10A ou uma de 20A, este quadro apresenta espaço suficiente para suportar esses componentes. Para além do mais, permite continuar a cumprir com as distâncias mínimas para assegurar o não aquecimento do armário e o mau funcionamento do mesmo.

Além disso, na lateral deste armário foi colocada uma ficha monofásica que será necessária para a ligação do *access point*, uma ficha trifásica para a alimentação do quadro e as fichas para as ligações aos cabos dos eixos e às válvulas de elevado desempenho.

No anexo C estão os desenhos de conjunto do armário elétrico de comando para diferentes configurações de unidade energética e eixos utilizados. Cada componente elétrico encontra-se identificado.

3.9 Solução *Ethernet*

No desenvolvimento desta solução também se teve em atenção novas possibilidades para se estabelecer a comunicação entre os quadros elétricos. À parte da cablagem, foi discutida a hipótese de se proceder à instalação de rede *Ethernet* na comunicação entre elementos do sistema de ensaios. Efetivamente, para que o mecanismo cubra uma maior área de aplicações e de ambientes laboratoriais, a integração da cablagem nesta solução é indiscutível, na medida em que nem sempre se dispõe de componentes que suportem outros meios de comunicação. Porém, é de notar que cada vez menos se recorre a este método e começam-se a introduzir outros formatos, como é o caso das redes *Ethernet*.

O uso de comunicação por rede local *Ethernet* implica a divisão do fluxo de dados em pacotes, conhecidos como *frames*. Estes pacotes incluem informação sobre o endereço de origem e destino, deteção de erros, os dados que se pretendem transmitir e o tipo de encapsulamento.

Esta rede de comunicação, por ser relativamente fácil de projetar e implementar, possuir elementos de baixo custo comparativamente a outras redes e por permitir diversos protocolos dentro do mesmo padrão, tem vindo a ganhar notoriedade no meio industrial. De acrescentar que a troca de informações é mais rápida comparativamente com a cablagem e muito utilizada em aplicações que requeiram comunicação em tempo-real.

Assim, para o sistema desenvolvido neste estudo, as ligações estabelecidas entre o armário de comando e de potência com as válvulas proporcionais de elevado desempenho assim como com os transdutores dos eixos pode ser feita via *Ethernet*, caso haja essa possibilidade por parte dos componentes do chão de fábrica. Relativamente aos quadros elétricos, os bornes correspondentes a esses componentes seriam substituídos por um *switch*, cuja função é receber e enviar para o autómato, os sinais dos diversos elementos. O fluxo de informação é feito segundo um cabo de ligação *Ethernet* com conector RJ45 [32, 33].

Na descrição do controlador e módulo *Ethernet* selecionados sublinhou-se a vantagem que estes componentes têm para trocar informação com uma velocidade de 1Gbit/s. No entanto, esta vantagem apenas seria aproveitada se o destino dessa informação também tivesse capacidade para a receber com essa rapidez. Novamente, analisando as várias hipóteses de *switches* que a empresa *Schneider* dispõe, conclui-se que o componente com referência MCSESM123F2LG0 não só apresenta o número suficiente de entradas RJ45 para proceder ao envio dos sinais aos respetivos componentes, como inclui 4 entradas capazes de trocar informação à frequência de 1Gbit/s.

De uma forma geral, é possível afirmar que em termos de aparência, os armários elétricos ficam mais organizados, uma vez que o volume de cablagem diminui com o uso de comunicação por rede *Ethernet*. Por outro lado, o fluxo de informação é feito com a necessária rapidez.

4 Arquitetura do *software*

A automatização do sistema de ensaio requer a elaboração de um *software* capaz de cumprir os objetivos e os requisitos impostos pelo projetista. A programação do autômato não se restringe ao comando dos componentes hidráulicos e elétricos para realizar os movimentos, mas inclui, por exemplo, procedimentos relacionados com a segurança e comunicação. Estes procedimentos implicam, geralmente, monitorização de dados, conhecimento do estado da máquina e deteção de eventuais anomalias funcionais. Neste sentido, construir uma aplicação de *software* exige uma estruturação prévia que englobe todos os aspetos funcionais do mesmo. Por outro lado, é necessário refletir sobre qual a sequência de ações mais coerente para a aplicação, possíveis restrições dessas ações e os dados indispensáveis para que autômato consiga, de forma independente, controlar o sistema.

Assim, neste capítulo é apresentada uma possível arquitetura desenvolvida para a aplicação de *software* de um sistema de ensaios flexível. Todos os modos de funcionamento e menus são descritos pormenorizadamente, em termos de movimentos associados, segurança, sequência de comandos, entre outros aspetos.

4.1 Estrutura global

O desenvolvimento do *software* implica um conhecimento, à priori, dos requisitos da aplicação, analisados no capítulo 3, deste documento. Concisamente, este servomecanismo pode assumir, em termos de *hardware*, várias configurações com diferentes propriedades associadas. Paralelamente, o nível de flexibilidade do *software* deve acompanhar a parte física. Na verdade, todas as máquinas automatizadas estabelecem uma ligação intrínseca entre o seu *hardware* e o *software*.

À partida, a dificuldade do *software* cresce com a adaptabilidade deste às várias aplicações que pode executar. Se o sistema pode adquirir diferentes configurações em função da utilização de diferentes componentes é importante introduzir no *software* as características desses componentes. De facto, o controlo tanto em força, como em velocidade e posição são dependentes das propriedades dos elementos. Conclui-se, desde logo, que a aplicação tem necessidade de guardar informações relativas aos eixos e às unidades energéticas e que consiga aceder a esses dados sempre que assim o desejar. Assim sendo, a utilização de uma base de dados parece ser uma opção incontornável para reunir todas as características das válvulas, atuadores, grupos hidráulicos, transdutores, eixos e unidades em que são registadas as leituras dos transdutores. Para a aplicação em causa, as relações que se podem estabelecer entre as tabelas agilizam o processo de procura dos dados e evita a redundância dos mesmos, uma vez que a base de dados eliminará toda a informação não necessária para a pesquisa em causa. Desta forma, sempre que o autômato carecer de algum dado para executar o seu código deve

formular um “pedido” para aceder à informação, por exemplo em SQL (Structured Query Language). Por fim, este processo evita que tenha de ser o autómato a sobrecarregar-se com todas as informações relativas aos vários componentes do sistema, uma vez que a base de dados está localizada num computador externo que mantém comunicação com o sistema de ensaios.

Em termos da realização de comando direto da máquina de ensaios pelo operador, é sempre vantajoso que esta conceda ao utilizador a possibilidade de mover, sensitivamente, os atuadores sem nenhuma trajetória definida, ou seja, em modo de funcionamento manual. Porém, a execução de ensaios deve seguir uma condição bem definida de trajetórias, controladas automaticamente com o devido rigor baseada na leitura de transdutores. Este procedimento, contrariamente ao manual, não deve ser sensitivo e, por isso, pode ser designado por modo automático de funcionamento de ensaio. Além destes dois modos, neste tipo de máquinas a capacidade de recolha de dados é uma componente valorizada, pois permite a posterior manipulação e estudo dos mesmos, pelo utilizador. Desta forma, o desenvolvimento de uma capacidade de aquisição e registo contínuo de dados de monitorização é uma mais-valia.

A exatidão e precisão com que os ensaios são controlados exige uma constante atenção à leitura dos transdutores. Por isso, o sistema de ensaio deve prever a capacidade para realização de calibrações periódicas dos elementos de medição necessários para a confirmação da classe da máquina. O processo de calibração requer sempre a operação face a uma instituição habilitada para o efeito e a realização de operações específicas, de acordo com a normalização aplicável. A calibração da grandeza força requer sempre a existência de um provete que possa ser sujeito ao máximo valor da máquina em condições de total segurança.

De um modo geral, a programação do autómato deve permitir:

1. Criação e execução de ensaios de controlo em deslocamento, controlo em força, ou controlo em velocidade, ou de uma outra grandeza existente na aplicação e que seja mensurável e variável com a ação de movimento do atuador;
2. Controlo manual do sistema, de forma sensitiva e segura;
3. Registo, seleção e monitorização dos sinais dos transdutores em tempo-real;
4. Registo, seleção e comando de unidade hidráulica;
5. Registo, seleção e controlo de cada um dos eixos a utilizar;
6. Configuração das várias trajetórias de solicitação elementares de um ensaio;
7. Registo dos dados dos transdutores em ficheiros, em tempo-real;
8. Atribuição de níveis de acesso para os utilizadores, com permissões específicas para cada nível.

Na figura 4.1 é feito um planeamento em diagrama de estados dos diferentes menus propostos e das ligações entre estes. De forma a facilitar a visualização do diagrama, apenas foram colocados os painéis principais.

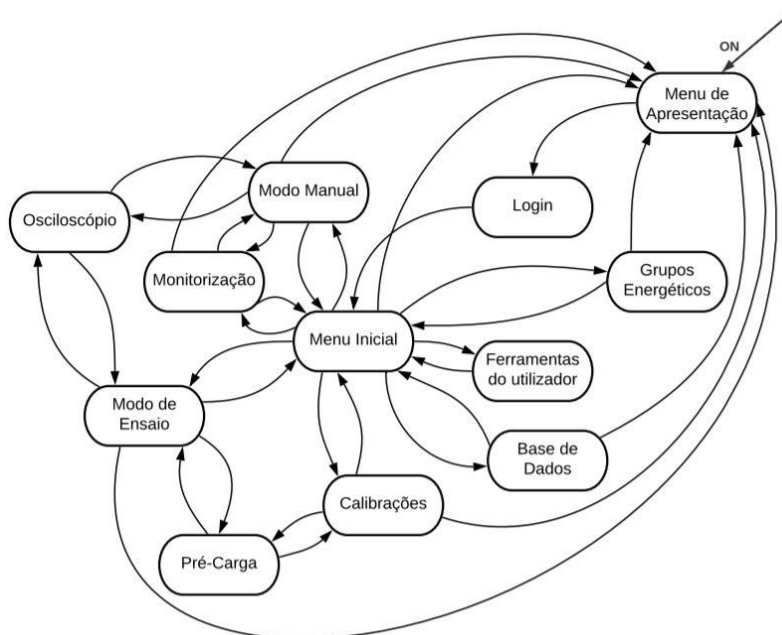


Figura 4.1 - Proposta de diagrama de estados do *software*.

Por questões de segurança, apenas com o procedimento de *login* validado é que um utilizador terá acesso ao sistema em si. Desta forma, pessoas não vinculadas ao funcionamento do sistema de ensaio não poderão aceder à aplicação.

Após validação das credenciais, o utilizador será confrontado com um novo menu, o Menu Inicial. Este painel é central no funcionamento de todo o programa, a partir do qual se poderá aceder a todos os procedimentos que sejam permitidos pelo nível de acesso atribuído. Como pode ser visto na figura 4.1, qualquer procedimento que seja selecionado a partir do menu principal, pode retornar a este. Por outro lado, todos os painéis permitem que o utilizador faça o *logout* da aplicação, retomando ao menu de apresentação. Contudo, como os procedimentos osciloscópio e ferramentas do utilizador são apêndices da estrutura principal da aplicação, apenas quando se regressa a esta é que se pode efetuar o *logout* das credenciais validadas.

No fluxograma da figura 4.2 é apresentado o processo base de funcionamento da aplicação de *software*. Adotando, novamente, uma perspetiva segura, todos os acessos a qualquer menu, assim como todos os movimentos que se pretendam realizar com a máquina, devem ser validados pelo autómato ou pela própria aplicação. No caso de menus através dos quais se pode iniciar movimentos ou comandos do sistema de ensaio é obrigatória a validação do acesso pelo autómato.

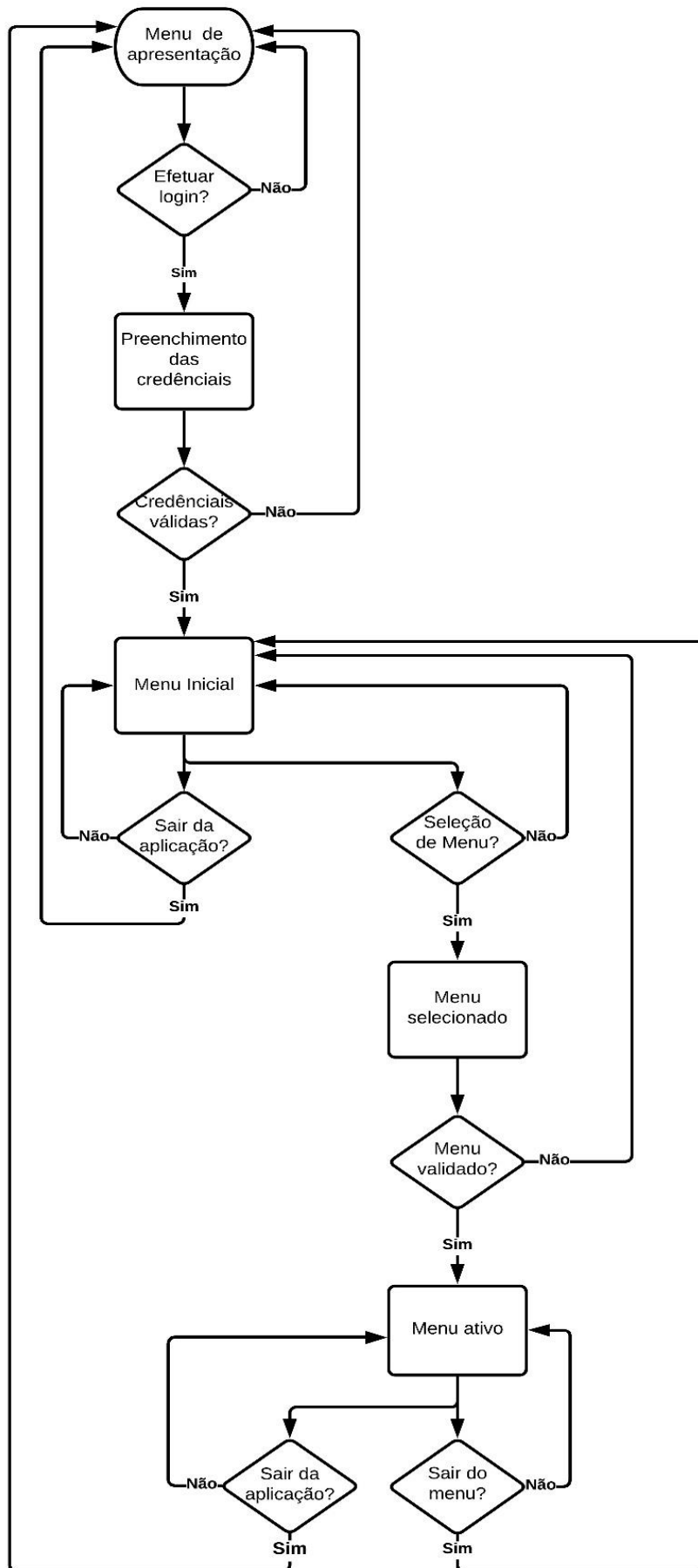


Figura 4.2 - Fluxograma do funcionamento base da aplicação.

4.2 Interface com o utilizador

Antes de se proceder à descrição detalhada de cada procedimento incluído na aplicação é importante entender de que forma a informação é transmitida ao utilizador. Assim, conjuntamente à exposição dos tópicos que devem ser inseridos no *software*, quer em termos de comandos de cada menu quer em termos de sequência destes, é feita também uma sugestão de como os dados podem ser apresentados a quem está a operar o sistema. A elaboração de uma interface com o utilizador pode seguir algumas regras que facilitam o processo de compreensão e de ação do próprio. Geralmente, a programação do autómato e da própria interface com o utilizador são etapas do projeto, muitas das vezes produzidas por pessoas que não estiveram envolvidas neste, desde o início. Por este motivo, antes de se proceder à construção em si, é importante criar documentação que descreva pormenorizadamente os objetivos de cada procedimento.

Na documentação relativa à interface da aplicação devem ser definidos alguns aspetos como:

- Menus necessários para a aplicação em causa;
- Comandos compreendidos por cada menu;
- Sequência de acesso a cada procedimento;
- Formato de exibição dos resultados;
- Cores que se pretendam destacar;
- Estrutura e design da informação em cada procedimento;
- Entre outros.

Para uma dada aplicação, é importante que a interface siga uma linha consistente relativamente ao design de apresentação da informação e à interação com o utilizador. Neste sentido, tudo o que é comum entre os diferentes menus deve aparecer no mesmo local/zona do *display* e com a mesma formatação. A aplicação do conceito de repetibilidade no design de uma interface soma alguns pontos em termos de segurança do sistema, no sentido em que o utilizador estará sempre ambientado à disposição dos diferentes comandos e informações. A interface deve-se tornar numa ferramenta de utilização intuitiva.

As cores utilizadas para situações de segurança devem ser reservadas e não aplicadas a outros contextos, uma vez que podem confundir o utilizador. A identificação escalonada da importância de cada informação deve ser feita através do uso de cor. Cores vibrantes são adequadas para textos que devem sobressair no *display* e cores suaves para os que não têm tanto peso no funcionamento do sistema. É favorável à leitura e à perceção dos comandos dos menus o uso de tons claros para o fundo do ambiente [34].

Por outro lado, não existem restrições quanto à densidade de informação em cada procedimento, uma vez que a necessidade varia consoante o tipo de comando e dos dados úteis que podem ser fornecidos à aplicação. Por isso, a quantidade de dados é limitada apenas pela perceção de quem elabora a interface. Porém, quanto mais sucintos forem os textos apresentados, mais rapidamente o utilizador capta a mensagem [34].

Por fim, o uso de botões requer alguma atenção quanto ao tamanho dos mesmos e quanto ao tipo de função. Merecem destaque aqueles que estão diretamente ligados com o funcionamento da máquina, e sobretudo relacionados com a segurança, comparativamente com aqueles que são utilizados apenas para navegação na interface [34].

4.3 Requisitos de programação

Seguidamente, são apresentados os requisitos que devem ser estabelecidos nos diferentes menus incorporados no sistema de ensaios flexível. Entendeu-se que para uma boa exposição desses requisitos seria interessante fazer uma abordagem de acordo com alguns tópicos. Assim, os menus estão contextualizados, de forma a compreender a sua utilidade na aplicação. Posteriormente, são apresentadas as condições que devem ser cumpridas para se aceder ao menu pretendido, assim como as etapas do processo para dar início aos comandos disponibilizados por esse menu. No caso de se tratar de um procedimento que tem como objetivo movimentar o servo atuador, esses movimentos também são explicados. Para cada situação são ainda referidos eventuais limites que não podem ser excedidos e que podem ser detetados ou identificados pela máquina, impedindo a realização de certas ações. Relativamente à supervisão, especificam-se quais os sinais que precisam de ser monitorizados pelo autómato e que podem influenciar a realização de alguns procedimentos. A possibilidade de interrupção da máquina é também explicada, no sentido em que pode advir da decisão do utilizador ou da própria programação do autómato dependendo das causas que forem associadas. Mais uma vez, a presença de condições de segurança é imprescindível e, portanto, são explicadas quais as considerações que devem ser tidas para se considerar “estado de emergência” e como proceder para o rearme do sistema. Por fim, refere-se a sequência de procedimentos que se encontram disponíveis após terminadas as tarefas no menu selecionado.

Neste sistema de ensaio flexível propõe-se a desativação do utilizador, ou seja, a execução do *logout* automaticamente, caso não se verifique qualquer diálogo entre o mecanismo e o utilizador durante um determinado período de tempo, por exemplo 15 minutos. Deste modo, caso o utilizador abandone o sistema com as suas credenciais validadas, as possibilidades de este ser utilizado por alguém sem acesso ao mesmo, são mais reduzidas. Acrescenta-se ainda que, se a máquina estiver em funcionamento, este não será interrompido, apesar de ter sido efetuado o *logout* do utilizador.

Por outro lado, como no mecanismo aqui desenvolvido não são considerados sinalizadores luminosos ou mesmo a existência de um *buzzer* (sinalização sonora), todos os avisos deverão aparecer sob a forma de mensagem na própria aplicação. Em algumas situações, as mensagens devem exigir a confirmação do utilizador para que o sistema possa avançar para a etapa seguinte.

4.3.1 Menu de apresentação/Login

Como primeiro painel desta aplicação propõe-se um “Menu de Apresentação”. Tal como o nome assim o refere, este menu deve dar a conhecer o *software* que se vai manipular. Por este motivo, informações como o nome do mesmo, o autor, o departamento onde foi realizado ou nome da empresa, data e o logótipo da instituição são pontos importantes para a sua identificação. No decorrer deste documento, o *software* será designado por *FlexyTester*.

Inicialmente, o menu de apresentação deverá redirecionar o utilizador para a realização do *login*. A partir do momento que as credenciais são validas novas possibilidades de ação devem surgir. Neste caso, faz sentido que o utilizador possa efetuar o *logout* ou aceder ao “Menu Inicial”, conforme a vontade do mesmo.

Nas imagens que se seguem é apresentado um protótipo do painel de apresentação e *login* para a aplicação em estudo.

Na figura 4.3 podem-se observar alguns dos pontos que foram considerados importantes para dar a conhecer ao utilizador as origens do *software*. Como se pode notar no canto superior direito, é indicado a data e o dia da semana em que se acede à aplicação, bem como o utilizador que a está a usar. Neste momento o mesmo ainda não está identificado, uma vez que ainda não procedeu ao *login*. Por este motivo, o utilizador só tem a possibilidade de seleccionar um botão de acesso, o *Login*. A indicação da pessoa que acedeu à aplicação e a data de acesso devem estar presentes em todos os menus.

Figura 4.3 - Menu de apresentação.

Assim que o utilizador pressiona o botão “*Login*” surge uma janela *pop-up* para que este indique o seu “*User Name*” e a sua “*Password*”, como pode ser observado na figura 4.4. Após validadas as credenciais pelo *software*, o utilizador pode, então, aceder ao “Menu Inicial” da aplicação, ou efetuar o *logout*.

Figura 4.4 - *Login* para entrar na aplicação.

De notar que no campo “User” já aparece o nome de quem acedeu ao programa, figura 4.5. A própria aplicação deve incluir um registo contínuo de todas as ações efetuadas assim como qual o utilizador associado, a data e a hora. Desta forma, facilmente se conseguem detetar ações que alteraram definições da aplicação e que, eventualmente, originaram erros no correr da mesma, como a modificação de informação da base de dados.



Figura 4.5 - Login validado. Está disponível o “Menu Inicial” da aplicação.

De salientar que o botão *logout* deve estar sempre disponível em qualquer painel principal. Na verdade, estes sistemas podem funcionar em modo automático durante longos períodos de tempo, pelo que o operador nem sempre poderá estar perto do mecanismo. Nestas situações, o operador pode efetuar o *logout* da aplicação, impossibilitando o seu diálogo com a máquina. Caso a máquina precise de estabelecer diálogo com o utilizador, deve informá-lo através de uma mensagem enviada para o seu telemóvel. Caso, o utilizador não proceda ao *login*, então a máquina deixará o seu estado ativo.

O *grafcet* da figura 4.6 representa a sequência de ações a partir do menu de apresentação.

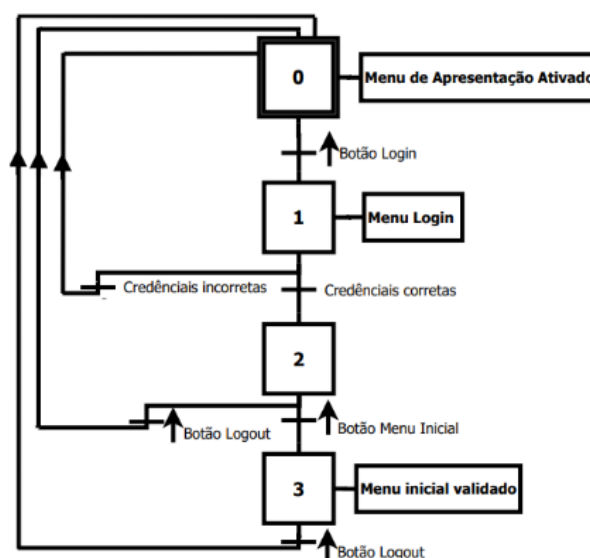


Figura 4.6 - *Grafcet* de funcionamento do menu de apresentação/login na aplicação.

4.3.2 Definições do utilizador

Relativamente ao utilizador, o acesso deste aos comandos disponíveis no *software* deve ser gerido de forma a evitar que alguém sem formação na área de manutenção ou de programação possa alterar o funcionamento da máquina. Deste modo, é importante estabelecer níveis de acesso que restringem ou não a entrada em alguns procedimentos. Na tabela 4.1 são definidos os níveis de acesso e os comandos que se encontram disponíveis para cada um.

Tabela 4.1 - Níveis de acesso dos utilizadores.

Nome do nível de acesso	Nível de acesso	Funções
Fabricante	Máximo	Acesso a todas as capacidades da aplicação. Acesso exclusivo aos parâmetros limite funcionais da máquina e a parametrização relativa a segurança, caso exista.
Administrador	Médio/alto	Ação restrita à configuração de acesso dos utilizadores. Regista os utilizadores e os seus níveis de acesso. Não tem autorização para funcionar com a máquina pois, nesse caso, teria de ter uma formação própria.
Especialista	Médio	Nível adequado a quem executa a configuração da máquina. Acesso ao modo manual, criação, edição e realização de ensaios, calibrações, monitorizações, osciloscópio, características dos controladores e base de dados. Pode adicionar, alterar e interditar informação à base de dados e aos grupos energéticos.
Operador	Reduzido	Nível adequado a quem opera a máquina. Acesso ao modo manual, modo de ensaio, osciloscópio e monitorização. O operador pode também aceder à base de dados, mas apenas para visualização de informação.

Todos os utilizadores podem aceder à sua informação sendo-lhes concedida autorização para alterar a sua “password”. No entanto, o acesso a este comando apenas é possível a partir do Menu Inicial. De referir que a remoção de qualquer informação da base de dados não deve ser permanente. Quando algum dos utilizadores pretender remover dados, na prática apenas os colocará em modo não ativo. Posteriormente, o especialista ou fabricante poderão recuperar esses dados, tornando-os ativos.

A figura 4.7 mostra uma possibilidade de codificação para o acesso às ferramentas do utilizador - botão no canto inferior direito destacado pelo retângulo vermelho. De certo modo, como a gestão das informações dos utilizadores não deve ser considerada um procedimento principal, para esta aplicação, faz sentido que a mesma não esteja em destaque.

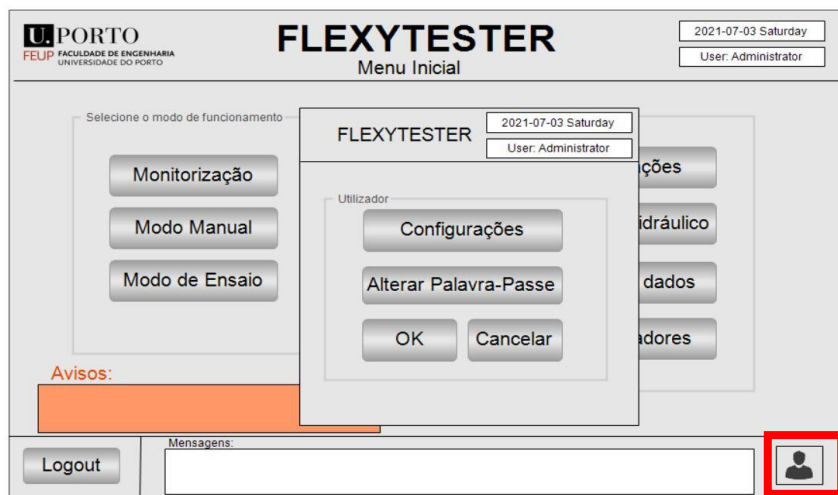


Figura 4.7 - Ferramentas do utilizador.

Na figura 4.8 é apresentada uma janela *pop-up* que permite a alteração da “palavra-passe” de acesso a esta aplicação. Esta janela pode ser acedida por todos os níveis de acesso. Contudo, apenas o administrador consegue criar ou alterar o nome de utilizador. De acrescentar que nenhum nível de acesso pode aceder à *password* dos outros utilizadores. Como é o Administrador que adiciona novos elementos, deve ser emitida uma palavra-passe inicial, mas que na primeira utilização deve ser alterada pelo próprio utilizador.

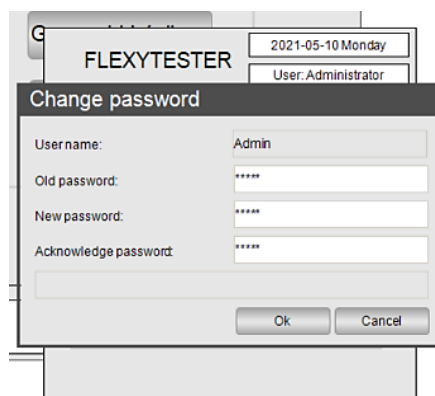


Figura 4.8 - Menu para alteração da palavra-passe

Finalmente, a figura 4.9 apresenta uma possível janela de configurações, apenas acessível ao administrador, em que é permitido alterar qualquer dado de qualquer utilizador da aplicação, com exceção da password, uma vez que não tem acesso a essa informação. Somente o administrador deverá ter a capacidade para adicionar novos elementos, editar as suas informações ou tornar inativo algum elemento já configurado.

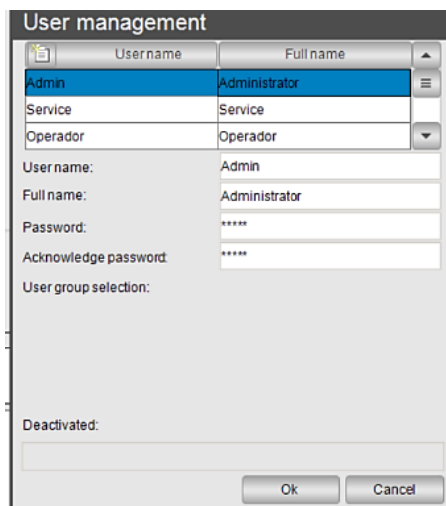


Figura 4.9 - Janela de configuração do utilizador.

4.3.3 Menu Inicial

O “Menu Inicial” é o ponto de partida da aplicação *Flexytester*. A partir deste painel pode-se aceder a qualquer um dos modos de funcionamento e a qualquer informação sobre base de dados, calibrações, controladores, ferramentas do utilizador e grupos hidráulicos dependendo da permissão concedida a cada utilizador. Portanto, a apresentação deste menu não varia consoante o nível de acesso de quem procede ao *login*, mas alguns dos comandos estarão

inacessíveis. Estará sempre disponível a opção de *logout*. Por outro lado, de forma a informar constantemente o utilizador de eventuais procedimentos e/ou problemas, deverá ser garantido espaço para mensagens de estado e avisos. O acesso a este menu exige que o utilizador insira as suas credenciais a partir do menu de apresentação. Assim que a aplicação valide o utilizador, este pode optar por aceder ao menu inicial ou efetuar o *logout*.

Quando o utilizador pretender avançar na aplicação, pode então aceder a qualquer um dos menus disponíveis, consoante o seu nível de acesso. Conclui-se, portanto que não existe qualquer impedimento prático ou teórico que impossibilite a passagem para outro menu. Na seguinte imagem, figura 4.10, é apresentado um possível exemplo de como este menu poderá ser constituído. A colocação de todos estes possíveis procedimentos, na zona central do painel, garante-lhes um lugar de destaque, comparativamente com a restante informação apresentada. Como se pode observar, ainda, a cor alaranjada sobressai a área onde surgirão possíveis avisos, no decorrer da aplicação.



Figura 4.10 - “Menu Inicial”

A figura 4.11 representa a sequência de ações do “Menu Inicial”.

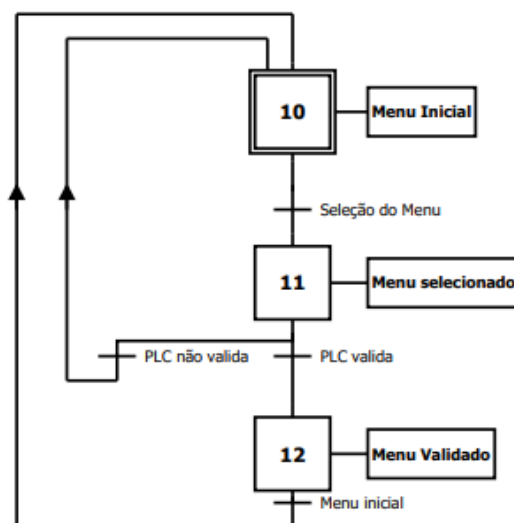


Figura 4.11 - *Grafcet* de funcionamento do “Menu Inicial”.

Neste menu, o único comando que o utilizador pode efetuar é a seleção de algum dos procedimentos disponíveis. No caso de ser selecionado, o acesso só é garantido após validação.

4.3.4 Grupos Hidráulicos

A flexibilidade que se pretende inserir no sistema de ensaios, em estudo, acaba por se refletir no nível de complexidade que a programação pode atingir. Ao contrário do que acontece nas máquinas de ensaio de referência que apresentam todos os componentes perfeitamente definidos e inalteráveis e que, por isso, a programação apenas se tem que restringir ao controlo de uma única solução de *hardware*, nos sistemas flexíveis o *software* deve ter a capacidade para abranger todas as configurações possíveis. Neste sentido, é importante introduzir as características das unidades energéticas na base de dados da aplicação, para que essas informações sejam acessíveis nos momentos em que se pretendem realizar movimentos. Desta forma, o menu Grupos Hidráulicos, tal como um sistema de informação, deve permitir a adição de uma nova unidade energética, a edição de alguma já criada e a interdição de unidades que já não fazem sentido para as aplicações.

O acesso a este menu é feito a partir do menu inicial e após validação pela própria aplicação, uma vez que deve ser analisado se o utilizador em questão apresenta nível de acesso com permissão para tal. Assim que o acesso for garantido, o utilizador deverá começar por definir que função pretende realizar, ou seja, criar, editar ou interditar grupos energéticos. Esta definição ajuda, posteriormente, na comunicação com a base de dados a partir da programação SQL. Caso o utilizador pretenda adicionar um novo grupo hidráulico, deve ser indicado o nome que se pretende atribuir e os componentes que o constituem, incluindo os transdutores que fazem parte da sua estrutura. No entanto, a programação deve impor que apenas seja possível selecionar um transdutor que já se encontre registado na base de dados. Mais uma vez, as características do transdutor são fundamentais durante o processo de controlo do mecanismo e, por isso, caso estas não sejam indicadas e calibradas, o sistema não conseguirá controlar os movimentos corretamente, ou com a precisão desejada.

Para editar um grupo hidráulico deve-se fazer uma pesquisa de todos os existentes na base de dados e selecionar qual é que se pretende editar. Na edição de um grupo energético pode-se alterar o nome do mesmo e os elementos que o constituem, adicionando ou removendo estes. Por fim, para interditar apenas é necessário escolher qual dos grupos se pretende deixar inativo. Todas as alterações feitas (criar, editar ou interditar) devem ser guardadas. Neste momento, a aplicação deverá mostrar uma mensagem numa janela pop-up para que o utilizador confirme essas alterações. Se o utilizador abandonar o menu sem validar as alterações, a aplicação não as irá considerar.

Nunca poderão ser introduzidos dois grupos energéticos com o mesmo nome. Depois de algum grupo hidráulico ter sido teoricamente interditado, ou seja, estar no estado inativo, apenas o especialista e o fabricante podem voltar a ativá-lo. Embora o grupo hidráulico não esteja ativo, não se poderá criar outro com o mesmo nome. Quando o utilizador terminar de efetuar todas as alterações que pretenda, pode regressar ao menu inicial. A partir deste, todos os procedimentos englobados no seu nível de acesso podem ser selecionados.

Na figura 4.12 é feita uma proposta para o painel da aplicação relativa aos grupos hidráulicos. Na *combobox* é selecionado a ação (criar, editar ou interditar) e caso se pretenda editar ou interditar aparecerá um botão de pesquisa para que o utilizador possa escolher o grupo hidráulico, guardado na base de dados. Na eventualidade do sistema conter uma válvula

limitadora proporcional de pressão, deve-se indicar qual a válvula em questão, que precisa de já ter sido introduzida na base de dados.

Figura 4.12 - Menu para criar, editar ou interditar Grupos Hidráulicos.

4.3.5 Base de dados

O pensamento tido para com os grupos hidráulicos é reaproveitado para o menu base de dados. Na constituição dos sistemas de ensaio flexíveis está disponível, para além do módulo da unidade energética, o módulo do servo atuador. Cada módulo apresenta vários componentes com determinadas características, como válvulas, transdutores e atuadores. Por este motivo, considerou-se importante reservar um procedimento exclusivo para a organização da informação na base de dados. Por outro lado, deve ainda ser feita uma referência às unidades em que o sistema irá trabalhar. Assim, na aplicação que se pretende desenvolver, quando se acede à base de dados, esta deverá conter outros separadores. A esses separadores deram-se o nome de: Atuadores, Transdutores, Válvulas, Unidades e Eixos.

É ainda importante referir que para o sistema funcionar, algumas variáveis que, entretanto, se inseriram na base de dados devem ser definidas como variáveis base e, portanto, devem ser protegidas. Este procedimento é feito essencialmente no separador Unidades. Nesta situação, todas as outras variáveis adicionadas, posteriormente, devem advir das variáveis de base. As variáveis protegidas não podem ser alteradas nem eliminadas independentemente do nível de acesso, com exceção do fabricante, responsável pela sua gestão.

A qualquer altura o utilizador pode regressar ao menu inicial, tendo ou não guardado as alterações feitas. Caso não tenha guardado, essas alterações não serão consideradas. Nesta situação, a aplicação deve mostrar um aviso para confirmar se o utilizador pretende abandonar o comando. Para se assegurar que todos os campos presentes na base de dados, para cada componente, são preenchidos devem surgir mensagens a indicar quais os dados que estão em falta, no momento em que o utilizador mostra interesse em salvar as suas alterações.

Novamente, o acesso a este menu é feito a partir do menu inicial, com a validação por parte da própria aplicação. Quando validado, o utilizador pode optar por seleccionar algum dos separadores presentes na base de dados ou retroceder na aplicação.

Na figura 4.13 propõe-se então um Menu para acesso à base de dados. Esta janela, por não precisar de tanta informação como algumas das janelas mostradas anteriormente, pode ser apenas uma janela *pop-up* que é ativada quando o menu da base de dados é pressionado e validado. Caso se pretenda regressar ao menu inicial é suficiente pressionar o botão “cancelar”.



Figura 4.13 - Menu de acesso à “Base de Dados”.

O *grafcet* da figura 4.14 representa o procedimento para ingressar no menu “Base de Dados”.

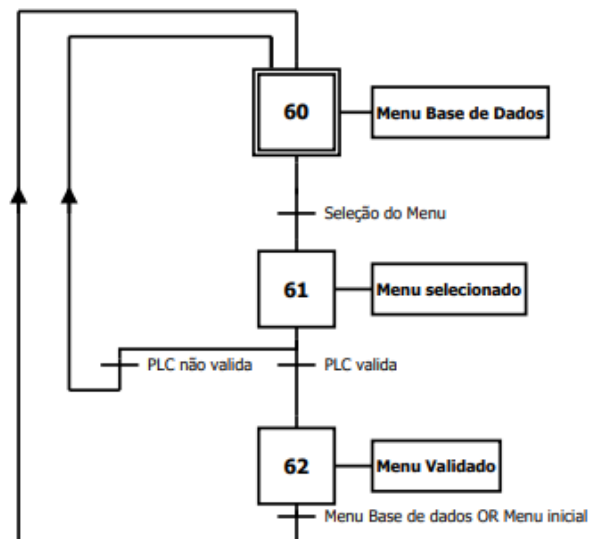


Figura 4.14 - *Grafcet* de funcionamento do menu base de dados.

Este menu apresenta o mesmo procedimento do menu inicial. O utilizador pode ou não proceder à seleção de outro menu. Caso selecione, o acesso apenas é garantido após validação. No caso de não pretender selecionar nenhum dos separadores incluídos na base de dados, pode regressar ao menu inicial.

4.3.5.1 Atuadores

Assim que o utilizador acede ao menu da base de dados, pode seleccionar o separador “Atuadores” para executar alterações das informações dos mesmos, se assim pretender. Este procedimento é necessário para que se possam utilizar, posteriormente, os atuadores no modo manual ou no modo de ensaio. A validação do acesso é, novamente, feita pela aplicação. Tal como foi visto anteriormente, o operador apenas pode fazer consulta dos dados.

A qualquer altura o utilizador pode regressar ao menu inicial ou retroceder para o menu base de dados, tendo ou não guardado as alterações feitas. Caso não tenha guardado, essas alterações não serão consideradas. Nessa situação, a aplicação deve então mostrar um aviso para se confirmar se se pretende abandonar o comando.

Tal como foi sugerido para o menu “Grupos Hidráulicos”, o utilizador deve indicar a ação que pretende executar – criar, editar ou interditar informação. Este procedimento é importante para a posterior comunicação com a base de dados. Caso se trate de um operador, como este não pode proceder a alterações não terá que indicar o tipo de ação. A própria programação deverá redirecioná-lo para um menu onde apenas é possível fazer consulta.

Para se adicionar um novo atuador deve ser inserido o nome que se pretende atribuir, o tipo (simétrico ou assimétrico), o diâmetro do êmbolo, o diâmetro da haste, o curso do mesmo e a pressão máxima de funcionamento. A repetição de nomes de atuadores não deve ser permitida, evitando que nos modos de ensaio e manual haja confusão com a escolha dos mesmos. Para editar a informação de um cilindro deve-se fazer uma pesquisa de todos os existentes na base de dados e seleccionar aquele que se pretende editar. A edição deve permitir alterar todos os parâmetros referentes ao atuador, com exceção do nome atribuído. Por fim, para interditar apenas é necessário escolher qual se pretende desativar. Todas as alterações feitas (criar, editar ou interditar) devem ser guardadas.

Não há qualquer restrição prática ou teórica que limite a entrada noutros procedimentos, de acordo com os níveis de acesso de cada utilizador, depois de terminada toda a atividade no menu “Atuadores”.

4.3.5.2 Transdutores

Todos os transdutores utilizados, quer em modo manual quer em modo de ensaio, devem estar registados na base de dados. As suas características são fundamentais para, posteriormente, se proceder ao controlo do sistema. Este menu é mais um dos separadores possíveis de serem seleccionados a partir do menu base de dados. A qualquer altura o utilizador pode abandonar o procedimento e voltar para o menu inicial ou retroceder para o menu base de dados, tendo ou não guardado as alterações feitas. Mais uma vez, caso não tenha guardado, essas alterações não serão consideradas.

Novamente, os utilizadores devem indicar o tipo de ação que pretendem executar, salvo os operadores, pois apenas podem fazer consulta. A adição de um novo transdutor requer o preenchimento de vários campos. Primeiramente, deve ser inserido o nome pelo qual o transdutor vai ficar conhecido, ao longo da aplicação. Posteriormente, deve ser indicada a tecnologia do mesmo, ou seja, se se trata de um transdutor para medição do deslocamento, força, pressão, temperatura, velocidade ou aceleração. É importante referir qual a unidade de funcionamento do mesmo, a sua gama nominal, a sua gama nominal de tensão, a gama de

segurança (decisão que, frequentemente, parte dos objetivos do utilizador pelo que pode ou não coincidir com a gama nominal), o seu *offset* e o ganho e a direção, no caso dos transdutores cujo sentido de variação está de acordo com o sentido de um movimento ou no inverso. Para editar a informação de um transdutor deve-se fazer uma pesquisa de todos os existentes na base de dados, selecionando aquele que se pretende editar. A edição deve permitir alterar todos os parâmetros citados anteriormente, com exceção do nome. Por fim, para interditar apenas é necessário escolher qual se pretende desativar.

Concluídas todas as ações que se pretendem executar neste procedimento, todos os menus ficam disponíveis para serem selecionados pelo utilizador. Desta forma, não há qualquer restrição de acesso, à parte das permissões garantidas pelas credenciais de cada pessoa.

4.3.5.3 Válvulas

As válvulas fazem parte da constituição tanto das unidades energéticas como dos eixos que se utilizarão nas aplicações. Porém, caso as suas características não sejam inseridas na base de dados, as válvulas não podem ser associadas, posteriormente, aos servo atuadores e às unidades energéticas adicionadas na aplicação. Por este motivo, o mesmo procedimento feito para os atuadores e transdutores deve também ser aplicado às válvulas, até porque as suas características são fundamentais para posteriormente se proceder ao controlo do sistema. De facto, quer as válvulas de elevado desempenho ou as válvulas limitadoras de pressão proporcionais permitem ajustar o seu comando de acordo com a tensão que é enviada ao seu solenoide. Por conseguinte, esse comando influencia, a velocidade do atuador e a capacidade de força de que ele consegue dispor.

O procedimento de acesso é igual ao procedimento explicado para o separador dos atuadores e dos transdutores. Quando o utilizador entra no menu, após validação, deve indicar o tipo de ação que pretende executar. No caso de se pretender adicionar uma nova válvula à aplicação, todos os campos relativos à mesma devem ser preenchidos, como o nome, a zona morta, o caudal nominal, a pressão nominal, o deslocamento máximo da gaveta, diâmetro da gaveta e o valor de percentagem excedente relativamente aos 100% de caudal nominal, Δy , caso a curva fosse totalmente linear. A edição permite alterar todos estes parâmetros, com exceção do nome atribuído, e a interdição traduz-se na inativação da válvula selecionada. Para que todas as alterações sejam consideradas pela programação, o utilizador deve guardar as mesmas.

A qualquer altura o utilizador pode regressar ao menu base de dados, ou voltar para o menu inicial e, posteriormente, aceder a outro procedimento sem qualquer restrição para além do nível de acesso de cada um. Caso não tenha guardado as alterações que efetuou, essas não serão consideradas.

4.3.5.4 Unidades

A congruência de todos os dados e resultados utilizados num sistema de ensaio parte da necessidade de se definir desde o início quais as unidades base do sistema. Contudo, algumas situações adequam-se melhor a outra escala. Desta forma, para que a aplicação seja abrangente em todos os campos, é importante criar na base de dados um espaço onde vão sendo declaradas todas as unidades que se pretendem acrescentar. No entanto, as unidades base devem ser dadas como protegidas, pelo que nunca poderão ser editadas e alteradas. Todas as outras unidades devem estar então inseridas numa escala referente a estas.

A qualquer altura o utilizador pode regressar ao menu inicial ou retroceder para o menu base de dados, tendo ou não guardado as alterações feitas, confirmando, por isso, a sua ação.

O acesso a este procedimento é feito apenas com a validação por parte da aplicação, dado que apenas se fará fluxo de informação entre este e a aplicação da base de dados. Depois do menu estar ativo e do utilizador ter indicado o tipo de ação, com exceção do operador, este pode começar por inserir o nome, a tecnologia que se pretende utilizar (força, pressão, posição, entre outras), se é ou não protegida e a escala da mesma, no caso de se adicionar uma nova unidade. Por sua vez, a edição deve permitir alterar todos os parâmetros, exceto o nome. Por fim, para interditar apenas é necessário escolher qual se pretende desativar.

Tal como acontece nos outros separadores relativos à base de dados, não há qualquer restrição na sequência de procedimentos selecionados. O utilizador pode regressar ao menu inicial e optar por outro menu aí presente, ou permanecer no menu da base de dados.

4.3.5.5 Eixos

O último separador que pode ser acedido através do menu base de dados é relativo aos eixos do sistema. No sistema de ensaio, um eixo é resultado da incorporação de um atuador, uma válvula direcional proporcional de elevado desempenho, e os transdutores associados. Nas secções anteriores já foram descritos os procedimentos para adicionar, editar e remover todos estes componentes. Chegou altura de os associar para que a programação conheça todas as relações estabelecidas entre eles e consiga, dessa forma, recolher toda a informação necessária ao controlo do sistema em força, velocidade ou deslocamento. A validação do utilizador é feita a partir da própria aplicação. Este menu, ao contrário dos anteriores, apenas exige que se indique a válvula de elevado desempenho, o atuador, os transdutores que fazem parte da constituição do eixo que se pretende trabalhar e o nome pelo qual ficará conhecido. Novamente, todos os componentes selecionados já devem estar inseridos na base de dados. Tal como foi feito nos outros menus, apenas se podem executar alterações depois de se indicar o tipo de ação que o utilizador pretende efetuar. A edição dos dados deve permitir alterar todos os aspetos, com exceção do nome atribuído ao eixo. Por fim, para interditar apenas é necessário escolher qual se pretende desativar.

A qualquer altura o utilizador pode regressar ao menu inicial ou retroceder apenas para o menu base de dados, tendo ou não guardado as alterações feitas. O menu eixos não restringe o ingresso a nenhum outro procedimento, a menos que esse não seja abrangido pelo nível de acesso de cada utilizador.

4.3.6 Calibrações

No modo manual, modo de ensaio, pré-carga ou de monitorização, a utilização de transdutores apenas é permitida se estes tiverem a eles associados os dados de calibração. Este cuidado permite que, posteriormente, nenhum ensaio seja inválido por inadequação dos valores lidos pelos transdutores. De facto, fatores como tempo de utilização, temperatura e humidade podem afetar a precisão das medições dos transdutores. Para se conseguir alcançar um nível de exatidão e precisão é então necessário que se executem calibrações periodicamente.

Este procedimento deve permitir tanto a execução de uma nova calibração como apenas a consulta das que já foram feitas. Porém, só é possível calibrar um transdutor de cada vez. De salientar que o utilizador a qualquer altura pode sair deste menu. Caso proceda a uma calibração e esta não seja validada, a aplicação não a considera e não é guardada a sua informação na base de dados. Assim, antes do utilizador abandonar o menu das calibrações, deve aparecer uma mensagem na aplicação para que este confirme a sua decisão.

Tendo em conta que o procedimento de calibração exige movimento do sistema de ensaios, a sua validação não é apenas garantida pela aplicação, mas sim pelo autómato de comando. Não é suficiente confirmar se o utilizador tem permissão para aceder a este menu e, por isso, deve ser verificado se não há nenhuma condição de emergência ativada, como:

- Botão de Emergência atuado;
- Disjuntor do motor disparado;
- Fonte de 24VDC de potência desligada.

Na eventualidade do autómato não autorizar o acesso a este menu, deve ser dada uma justificação para tal, através da ativação de uma mensagem, facilitando a resolução do problema encontrado.

Assim que o procedimento se encontre ativo, o utilizador deve escolher qual o transdutor que pretende calibrar. Quando se seleciona o transdutor pretendido, é interessante ter a opção de visualização das suas características definidas na base de dados, para que se possa sempre confirmar se foi selecionado o transdutor que se pretendia. Deve ainda ser possível visualizar todas as calibrações que foram efetuadas a esse transdutor, uma vez que o objetivo pode ser apenas consulta. Se, pelo contrário, for realizada uma nova calibração ou alteração dos dados de alguma já existente, deve-se proceder à sua validação. Na base de dados devem ser guardados a data e hora de execução da calibração, o nome, o ganho e o offset do transdutor em caso de característica linear.

Portanto, pode-se proceder a uma calibração em “modo manual” ou em “modo de aprendizagem”. A calibração em modo manual é utilizada para transdutores com características lineares. Este tipo de transdutores seguem a equação: $y = ax + b$. A variável ‘a’ representa o ganho, a variável ‘b’ o *offset*, e ‘y’ representa a grandeza medida pelo transdutor na unidade pretendida, sendo ‘x’ o valor da grandeza elétrica enviada do mesmo. Assim, para estas situações apenas é necessário indicar o ganho e o *offset* e validar a calibração.

Por outro lado, quando a característica não é linear e não se conhece a equação que rege o comportamento do transdutor, é necessário proceder à calibração pelo modo de aprendizagem. Neste modo são inseridos valores associados à unidade de medida do transdutor e regista-se o valor da tensão correspondente. Geralmente, neste processo utilizam-se transdutores externos com maior precisão e já calibrados para ajudar no processo de leitura. Com o conjunto de pontos recolhidos, obtém-se a relação entre a tensão recebida pelo autómato e o valor da grandeza de medição. Neste procedimento, também se devem registar as leituras do transdutor padrão para que se consiga retificar a medição feita pelos transdutores utilizados na aplicação. Aplicando o método dos mínimos quadrados, o *software* deve ser capaz de encontrar uma função que relacione o comportamento dos dois instrumentos usados.

O cálculo do declive da reta de aproximação é dado pela equação 4.1.

$$m = \frac{N * \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.1)$$

E o seu *offset* pela equação 4.2.

$$b = \frac{N * \sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum (x_i * y_i)}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.2)$$

Desta forma, consegue-se obter a relação entre a leitura do transdutor padrão representado por x_i e o valor lido pelo transdutor em calibração, y_i .

O autómato deve acompanhar todo o procedimento de calibração e, por isso, verificar permanentemente a condição da central hidráulica, para ver se há alguma falha, como:

- Filtro do óleo colmatado;
- Nível do óleo não OK (baixo);
- Pressão da central hidráulica fora dos limites admissíveis;
- Temperatura do óleo da central hidráulica elevada;
- Relé de segurança não OK.

Nenhum transdutor deve sair da gama de segurança que foi definida. Se, porventura, isso acontecer, imediatamente o comando de calibração é interrompido e os dados não são validados. Novamente, deve ser apresentada uma mensagem a informar o utilizador. É importante, também, que o autómato verifique se as fichas dos eixos estão corretamente ligadas ao quadro elétrico.

Relativamente às falhas aqui indicadas, caso sejam detetadas no sistema, a segurança será ativada e o grupo energético desligado. Todas as atuações externas serão desligadas. O evento que criou a condição de insegurança é identificado, memorizado no registo de ocorrências de emergência e reportada a condição na aplicação. Quando a condição de segurança for reposta é dada ordem na aplicação para o rearme do relé de segurança. Uma vez rearmada a segurança, o operador deve iniciar uma nova calibração ou regressar ao menu inicial.

Após consulta ou validação da calibração feita, o utilizador pode aceder a qualquer um dos menus disponíveis no menu inicial.

A figura 4.15 representa um possível painel para o menu de calibração. Nesta etapa, o utilizador deverá selecionar o transdutor que pretende calibrar, através da *combobox* disponível. Nesta *combobox* apenas deverão aparecer os transdutores que, entretanto, já foram registados na base de dados. Assim, após a seleção, as suas características aparecem na tabela “Características do transdutor” e todas as calibrações que foram feitas ao mesmo, na tabela “Calibrações”. Tal como referido anteriormente, é possível realizar uma nova calibração, ou selecionar uma já existente e editá-la.

PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

FLEXYTESTER

Calibração

2021-07-03 Saturday
User: Administrator

Escolha do transdutor

Selecionar Transdutor:

Características do transdutor

Nome	Tecnologia	Unidade	gama nominal	gama nominal de tensão	gama de segurança	ganho	offset	direção

Calibrações

Código	Data
0	0
0	0

Adicionar Editar Consultar

Avisos:

Logout

Mensagens:

Figura 4.15 - Menu Calibração - Seleção do transdutor.

Dependendo da vontade do utilizador, este pode atuar o botão “Adicionar”, “Editar” ou “Consultar”. No entanto, os três botões redirecionam a aplicação para o painel apresentado na figura 4.16. Este painel, na edição e consulta das calibrações, apresenta os campos todos preenchidos com informações da calibração que foi selecionada pelo utilizador.

PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

FLEXYTESTER

Calibração

2021-07-03 Saturday
User: Administrator

transdutor

Nome Transdutor: %w

Código Calibração: %w

Pré-carga

Característica linear

Ganho: %i

Offset: %i

Tensão: %w

Valor: %w

Validar Calibração

Avisos:

Logout

Mensagens:

Característica não linear

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Tensão Valor lido

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Introduzir Tensão Valor lido

%w %w

Apagar Ler

Validar Calibração

Figura 4.16 - Menu Calibração - Execução da calibração.

4.3.7 Pré-carga e pré-posicionamento

Dependendo dos ensaios e das calibrações que se pretendem realizar, pode ser necessário proceder-se a uma pré-carga ou a um pré-posicionamento de um atuador ao qual está associado um transdutor. Este comando pode ser feito em deslocamento ou em força, especificando o valor que se pretende atingir, segundo uma velocidade que também pode ser definida pelo utilizador. A pré-carga tem que ser feita para um eixo de cada vez. Assim, quando o procedimento for requerido a partir do modo de ensaio e não do menu de calibrações, sempre que a pré-carga tiver sido concluída, o utilizador deverá ter a opção de permanecer neste menu e executar um novo procedimento para um novo atuador. Caso contrário, pode regressar ao menu anterior.

À partida, todos os utilizadores a quem foi concedido o acesso ao modo de ensaio ou de calibrações, também tem acesso à pré-carga. Porém, o autómato deve executar uma verificação das condições de emergência. Na eventualidade de alguma condição se verificar, o acesso é negado e, automaticamente, a aplicação regressará ao menu inicial.

Depois do modo estar ativado, deve-se escolher o grupo hidráulico que se pretende utilizar e ligar o mesmo. Para ligar o grupo hidráulico o autómato deve enviar um sinal elétrico para atuar as válvulas do circuito hidráulico e o contactor/*soft starter* do motor. Caso a unidade energética tenha válvula limitadora de pressão proporcional, esta também deve ser comandada pelo autómato, para se proceder ao ajuste da pressão pretendida na fonte. Com a central hidráulica ligada, o utilizador deverá definir a pressão e/ou velocidade do atuador. Assim, quando é pressionado o botão para iniciar o movimento, autómato inicia o comando analógico da válvula direcional de elevado desempenho enviando sinais de tensão entre -10VDC e +10VDC.

Consoante o tipo de controlo escolhido, introduz-se o valor que se pretende que o atuador atinja. Desta forma, o atuador deve avançar ou recuar até ser atingido o valor pretendido no transdutor de deslocamento ou na célula de carga, à velocidade e com a pressão disponível definidas no início do movimento. Depois de ser atingido o valor definido, a aplicação redireciona o utilizador para o painel das calibrações, ou painel de execução de ensaios, consoante a sequência de procedimentos seguida pelo utilizador.

A pré-carga ou o pré-posicionamento podem ser interrompidos a qualquer momento e, mais tarde, retomados ou abortados. No caso de ser abortado e o atuador esteja sujeito a uma força, a aplicação redireciona imediatamente para o modo manual para se poder movimentar o atuador sensitivamente, levando-o para uma posição em que a carga seja nula. Caso o atuador não esteja em carga, então, a aplicação volta para o menu inicial. Nas situações em que o utilizador deseje abandonar o procedimento, o grupo hidráulico deverá ser desligado quando a velocidade e a pressão definidas forem levadas a zero.

Durante o período em que o procedimento estiver ativo, o autómato deverá verificar permanentemente as condições de segurança. Se alguma condição se verificar, o mecanismo adota a reação já descrita no menu de calibrações e, portanto, fica imobilizado até que o problema seja resolvido. Após terminada a pré-carga e/ou pré-posicionamento fica disponível o acesso ao início da calibração ou execução do ensaio. Contudo, se porventura não se pretender realizar nenhum destes procedimentos, pode-se retroceder na aplicação, caso o atuador não esteja em carga. Regressando ao menu inicial, é possível selecionar qualquer menu disponível.

Na figura 4.17 é apresentada uma proposta para o menu de pré-carga. Na verdade, este procedimento em tudo se assemelha ao modo e funcionamento manual que será apresentado, a seguir. Contudo, a pré-carga, contrariamente ao processo manual, não é um procedimento sensível pelo que se deve definir uma posição ou uma força para se atingir.



Figura 4.17 - Menu de pré-carga.

4.3.8 Monitorização

A presença de um procedimento de monitorização é essencial por permitir a realização de registo de dados, sem que seja necessário que o sistema esteja em funcionamento. Este comando é utilizado durante um determinado período de tempo, quando se procede à manipulação dos eixos em modo manual ou simplesmente para adquirir dados. O acesso a este modo pode ser feito a partir do menu principal, mas também do modo manual.

A validação do acesso dos utilizadores é feita pela aplicação, uma vez que através deste menu não é efetuado qualquer movimento no sistema. O início da monitorização só deve ser possível depois de se definir a frequência de aquisição dos dados e selecionados os transdutores que se pretendem monitorizar, já registados na base e dados. Por fim, estas definições devem ser guardadas.

Este comando pode ser interrompido a qualquer momento do programa, mas não é possível retomar. Deverá proceder-se a um novo registo de dados. Sempre que a monitorização é interrompida, os dados devem ser guardados em Excel, segundo uma localização definida pelo utilizador. A monitorização não impossibilita o seguimento do programa para outros modos. Aliás, este comando é paralelo ao comando manual. Por isso, pode-se proceder para o modo manual caso o procedimento de monitorização tenha sido selecionado a partir deste, ou então é possível retomar o menu inicial e selecionar qualquer um dos procedimentos aí expostos. Se o utilizador optar por selecionar o modo de ensaio, então a monitorização é automaticamente interrompida, uma vez que esse procedimento já inclui o registo dos dados a ele associados.

A figura 4.18 apresenta uma possível estrutura do menu de monitorização. Na tabela apresentada na interface, apenas devem aparecer os transdutores calibrados.



Figura 4.18 - Menu de monitorização.

4.3.9 Modo Manual

No modo manual, o utilizador só pode executar o comando de um eixo do sistema a cada momento, definindo a pressão limite, caso aplicável, e a velocidade do movimento do atuador. Este comando possibilita, ainda, a definição do sentido do movimento (recuar ou avançar). A sua ativação exige que o operador selecione o procedimento na aplicação, colocando-o no estado de modo selecionado. Posteriormente, cabe ao autómato validar ou não essa seleção. Caso o modo manual fique inativo, então deve aparecer uma justificação para tal, através da ativação de uma mensagem. Desta forma, apenas com o procedimento no estado ativo é que se pode avançar para o menu, aqui em estudo, e realizar os movimentos pretendidos para o atuador.

O modo manual pode ser acedido através do menu inicial, mas também do modo de ensaio, depois deste ter terminado ou abortado e o atuador se encontrar em carga. O mesmo acontece, se o procedimento de pré-carga for abortado. A manipulação dos eixos, neste modo, é feita sensitivamente. De modo que o utilizador consiga visualizar a trajetória dos eixos em força e/ou em posição, é possível ter acesso ao osciloscópio.

Após seleção e validação do procedimento, o utilizador pode comandar o atuador. Para isso, em primeiro lugar deve-se escolher o grupo hidráulico que se pretende trabalhar e ligar o mesmo. Para ligar o grupo hidráulico o autómato deve enviar um sinal elétrico para atuar as válvulas do circuito hidráulico e o contactor/*soft starter* do motor. Caso a unidade energética tenha uma válvula limitadora de pressão proporcional, esta também deve ser comandada pelo autómato, para se proceder ao ajuste da pressão limite pretendida na fonte. Com a central hidráulica ligada, o utilizador deverá definir a pressão máxima pretendida e/ou velocidade do atuador. Assim, quando todo o grupo hidráulico se encontrar estabilizado e a velocidade definida na aplicação for diferente de zero, o utilizador pode dar início ao movimento, pressionando o botão para avançar ou recuar. O autómato inicia o comando analógico da válvula direcional de elevado desempenho enviando sinais de tensão entre -10VDC e +10VDC. Caso o utilizador não esteja a atuar os botões da aplicação, o sinal analógico para comando da válvula é nulo.

Para se desligar a central hidráulica, primeiro é necessário levar a pressão a 0% e a velocidade a 0 mm/s. Caso isso não aconteça deve aparecer uma mensagem. Assim, imobiliza-se o atuador.

A válvula de elevado desempenho deixa de receber comando e regressa à sua posição de segurança. Termina o sinal elétrico para acionamento do motor. Se, porventura, se ligar o grupo hidráulico, o regresso ao menu inicial apenas deverá estar disponível após a unidade energética ter sido desligada.

Em termos de limitações, o modo manual permite apenas o controlo de um único eixo do sistema, em posição. Não permite a definição de “valor a atingir”. O procedimento deve ser interrompido quando qualquer transdutor atinge um dos extremos da sua gama de segurança definida. Este procedimento apenas pode ser aplicado a componentes inseridos na base de dados e a transdutores calibrados, pelo que se algum destes requisitos não for cumprido deve aparecer uma mensagem ao utilizador.

Tal como é feito no menu de calibrações e de pré-carga, o autómato deve verificar a existência de condições de insegurança no processo de validação deste menu. Posteriormente, deve monitorizar permanentemente o filtro, o nível de óleo, a pressão e a temperatura da central hidráulica, assim como o estado do relé de segurança. Para qualquer anomalia encontrada pelo autómato, o sistema deve ser imediatamente imobilizado.

Após terminado o comando sensível dos atuadores, o utilizador pode sair do modo manual e seleccionar qualquer um dos procedimentos acessíveis a partir do menu inicial.

A figura 4.19 expõe uma possível solução para a interface do modo de funcionamento manual. Como se pode observar, neste painel é possível escolher a unidade energética e o eixo que se pretende utilizar. É dada a possibilidade ao utilizador para definir a pressão e a velocidade do movimento. A atuação dos botões de avanço e de recuo permitirão o movimento sensível do servo atuador. Por outro lado, este menu apresenta acesso direto ao osciloscópio para que seja possível visualizar graficamente a evolução em termos de posição e de força do sistema, assim como o acesso à monitorização. No lado direito, encontram-se as variáveis medidas tanto associadas ao eixo 1 como ao eixo 2. Desta forma, o utilizador é informado, continuamente, sobre os vários parâmetros lidos pela instrumentação aplicada ao sistema.



Figura 4.19 - Menu de funcionamento em “modo manual”.

4.3.10 Modo de ensaio

No modo de ensaio, o utilizador pode realizar um ensaio que já tenha sido configurado, ou optar por criar um novo. É possível ainda modificar um ensaio definido, anteriormente. Neste comando estão disponíveis diferentes trajetórias e o utilizador tem a oportunidade de alterar as propriedades base das mesmas.

A aplicação deve dispor de trajetórias do tipo:

- Monotónicas:
 - constante,
 - em rampa,
- Cíclicas:
 - em dente de serra,
 - em trapézio, e
 - sinusoidal.

Como o comando dos eixos é feito de forma independente, é permitido associar diferentes trajetórias a cada um dos eixos. A definição da ordem destas não é definitiva, podendo ser alterada a qualquer momento, salvo em pleno ensaio.

Nos menus “criar ensaio”, “editar ensaio”, “definição das trajetórias” e “alteração das propriedades” das trajetórias devem ser incluídos gráficos de força ou de posição, em função do tempo, para que o utilizador consiga, a todo o momento, visualizar o ensaio que está a criar/editar. Uma alternativa de visualização dos dados poderá ser a inclusão de gráficos de força vs posição, ao longo do tempo. Todos os transdutores que se pretendam utilizar devem estar registados e calibrados.

O modo de ensaio engloba outros subcomandos, como:

- Criar ensaio,
- editar ensaio, e
- executar ensaio.

Caso o utilizador não pretenda aceder a nenhum dos procedimentos mencionados pode regressar ao menu inicial.

Na figura 4.20 é apresentada a proposta de design para o painel de “modo de ensaio”.



Figura 4.20 - Menu de funcionamento em “modo de ensaio”

4.3.10.1 Criar Ensaio

Após a validação do modo de ensaio, por parte do automático, o utilizador pode seleccionar o procedimento “Criar Ensaio”. Antes de abandonar este menu, o utilizador deve guardar as alterações feitas, caso contrário não serão consideradas. Pode-se sair, a qualquer momento, deste painel e voltar para o “menu inicial” ou menu “modo de ensaio”.

Para cada eixo utilizado podem ser seleccionadas trajetórias. Cada trajetória é definida por um conjunto de características que podem ser alteradas pelo utilizador de forma a ajustar os ensaios aos objetivos estabelecidos. Ainda na caracterização dos movimentos, é possível escolher o tipo de controlo – em força ou em posição – para cada um.

Por fim, para além das limitações físicas do sistema, podem ser adicionadas condições de paragem. Estas condições de paragem podem ser do tipo:

- condição de deteção de “rutura”, ou
- valor de grandeza de transdutor utilizado (não o de controlo) atinge uma certa condição definida
- valor de combinação de grandezas de transdutores utilizados.

Para se criar uma condição de paragem deve-se então indicar o tipo e atribuir um nome – diferente de todos os utilizados na base de dados.

No caso da condição de “rutura” deve-se ainda indicar a direção da mesma – compressão ou tração. No caso de valor de transdutor é necessário assinalar qual o transdutor associado, os valores limites – mínimo e/ou máximo – e se a medição do valor limite é feita de forma relativa ou absoluta. No caso de combinação de grandezas, deve ser definida uma expressão matemática correspondente.

O sistema deve considerar como condição de “rutura” a que corresponde a um decréscimo do valor da força superior a 5% da capacidade máxima da célula de carga, relativamente ao máximo valor atingido pela força no ensaio. Desta forma, o sistema é obrigado a interromper a execução de um ensaio caso essa condição seja verificada tanto em tração como em compressão. Caso seja atingida uma condição de paragem por limites de transdutor, a execução do ensaio não será interrompida, mas passará para um próximo procedimento de ensaio, caso

exista. As condições de paragem definidas, a qualquer momento podem ser removidas ou alteradas, editando as suas propriedades

A validação deste menu é feita pela aplicação. A criação de um ensaio exige que seja indicado o nome pelo qual este ficará conhecido e quais os eixos que estão envolvidos. Para cada eixo as trajetórias selecionadas devem estar organizadas de acordo com sequência de movimentos desejada. Depois de sair deste menu, o utilizador pode ingressar em qualquer procedimento do modo de ensaio, ou voltar para o menu inicial.

Um exemplo de design para o menu “criar ensaio” é apresentado na figura 4.21. Para introduzir as trajetórias, o utilizador deve selecionar o botão “definir trajetórias”. De forma a tornar este painel mais intuitivo, esse botão poderá aparecer apenas se o eixo correspondente for escolhido para o ensaio em questão.

Figura 4.21 – Menu “Criar Ensaio”

Caso se pressione algum dos botões para definir as trajetórias, uma possível janela para esse procedimento poderá ser a apresentada na figura 4.22. Neste menu é fundamental assegurar uma zona para escolher o tipo de trajetória, atribuir um nome a esta e indicar o tipo de controlo. É interessante o utilizador, apesar da ordem de escolha das trajetórias, poder alterar a sequência estabelecida. Assim, apresentar sob forma de tabela todas aquelas que foram até então escolhidas garante maior clareza na visualização de eventuais trocas que se queiram fazer.

Através do botão “Propriedades” pode-se aceder às características da trajetória selecionada na tabela, incluindo condições de paragem.

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

FLEXYTESTER
Trajetórias

2021-07-03 Saturday
User: Administrator

Definição das trajetórias

Escolha a trajetória:
No selection

Nome:

Tipo de controlo:
No selection

Adicionar

Trajeto	Nome	Tipo controlo

Subir

Descer

Propriedades

Avisos:

Guardar

Logout

Mensagens:

Figura 4.22 - Menu de “definição das trajetórias” para cada eixo.

Um sistema de ensaios acentua a sua flexibilidade na capacidade de se movimentar segundo trajetórias sequenciais com características distintas. Desta forma, cada trajetória apresenta parâmetros de caracterização próprios, a seguir identificados e associados aos seus parâmetros:

- Trajetória “constante”: duração;
- Trajetória “em rampa”: amplitude e taxa de variação;
- Trajetória dente de serra: número de ciclos, amplitude e taxa para rampa ascendente e rampa descendente;
- Trajetória sinusoidal: amplitude, frequência, fase inicial e número de ciclos;
- Trajetória trapezoidal: número de ciclos, amplitude e taxa para a rampa inicial e final, e duração do patamar inicial e do patamar final.

As características dessas trajetórias podem ser alteradas, se o utilizador assim pretender, através do menu apresentado na figura 4.23.

Modificar Trajetórias

Condições Paragem

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

FLEXYTESTER
Trajetórias

2021-07-03 Saturday
User: Administrator

Selecionar Trajetória

Nome
1
2
3
4
5

Alterar

Editar Trajetória

Características	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

Avisos:

Guardar

Logout

Mensagens:

Figura 4.23 - Menu para “alteração das características” das trajetórias.

Relativamente ao menu de “condições de paragem”, este é dependente do tipo de condição considerada, como já foi referido anteriormente. As figura 4.24 e figura 4.25 são exemplos de possíveis designs para a condição de rutura e condição de grandeza de transdutor, respetivamente. Porém, os dois painéis apresentam uma tabela. Esta tabela tem como objetivo

reunir todas as condições criadas para a trajetória em causa e, a partir daí, dar ao utilizador a possibilidade de editar ou remover.

Figura 4.24 - Menu relativo às “condições de paragem” para rutura.

Figura 4.25 - Menu relativo às “condições de paragem” por valor de transdutor.

4.3.10.2 Alterar Ensaio

O menu “Alterar Ensaio” é outro separador ao qual o utilizador pode aceder a partir do modo de ensaio. O acesso a este menu deve ser autorizado pela aplicação. No final, o operador deve guardar as alterações feitas, caso contrário não serão consideradas. A qualquer momento pode-se sair deste painel e voltar para o menu modo de ensaio ou menu inicial.

Depois de validado o acesso do utilizador, este deverá seleccionar um ensaio da base de dados para proceder à edição do mesmo. As características das trajetórias que já estão definidas podem ser modificadas e podem ser adicionadas, removidas e alteradas as condições de paragem. Caso se pretendam remover ou adicionar trajetórias deve ser criado um novo ensaio. Todos os exemplos de design da interface demonstrados para o menu “criar ensaio”, são também aplicados nesta situação. A diferença entre estes dois procedimentos é relativa à gestão da informação, na própria base de dados.

4.3.10.3 Executar ensaio

Por fim, neste procedimento podem ser executados ensaios já existentes na base de dados ou que, entretanto, tenham sido criados para aplicação em causa. Este modo deve permitir o acesso à janela de “pré-carga”, antes do início do mesmo, e o acesso ao osciloscópio enquanto o procedimento estiver ativo. Durante a execução de um ensaio, o procedimento pode ser interrompido e retomado no mesmo ponto. A opção de abortar o procedimento também deve estar disponível. Caso este seja abortado, não há possibilidade de retomar, mas é possível guardar os resultados do mesmo. Na eventualidade de ser necessário executar um procedimento de “pré-carga”, toda a informação já definida no menu de execução de ensaio é mostrada na janela de “pré-carga” e não pode ser alterada.

Para dar início à execução de um ensaio, o utilizador deverá estar com o modo de funcionamento ativo e o ensaio que se pretende realizar guardado na base de dados. Não pode haver nenhuma condição de emergência ativa. Todas as estas condições já foram referidas nos pontos anteriores.

Se o procedimento não for validado deve aparecer uma mensagem ao utilizador informando-o do motivo. Quando ativo, o utilizador deverá carregar o ensaio que pretende executar. Para iniciar a sua execução, deve ser escolhido o grupo hidráulico que se pretende utilizar. Para ligar o grupo hidráulico o autómato deve enviar um sinal elétrico para atuar as válvulas do circuito hidráulico e o contactor/*soft starter* do motor.

Caso a unidade energética tenha válvula limitadora de pressão proporcional, esta também deve ser comandada pelo autómato, para se proceder ao ajuste da pressão pretendida na fonte. Com a central hidráulica ligada, o utilizador deverá definir a pressão e/ou velocidade do atuador. Assim, quando é pressionado o botão para iniciar o movimento, autómato inicia o comando analógico da válvula direcional de elevado desempenho enviando sinais de tensão entre -10VDC e +10VDC. Assim que seja possível iniciar o ensaio, o atuador executará a sequência de trajetórias definidas no mesmo.

Em situações de falha do sistema, a segurança será ativada e o grupo energético é desligado e todas as atuações são interrompidas. O evento que criou a condição de insegurança é identificado, memorizado no registo de ocorrências de emergência e reportada a condição na aplicação. Isto apenas é possível, devido à monitorização permanente por parte do autómato. Quando a condição de segurança for reposta é dada ordem na aplicação para o rearme do relé de segurança. Uma vez rearmada a segurança, o operador não pode retomar o ensaio, mas pode recommençar ao aparecer a mensagem (“Pretende recommençar ensaio?”), ou abortar o comando e voltar para o menu “Modo de Ensaio”. Caso pretenda permanecer neste menu, aparece novamente a hipótese de pré-carga/pré-posicionamento.

Por último, o menu de ensaio em tudo se assemelha ao menu do modo manual. Todavia, neste caso, deve ser carregado o ensaio guardado na base de dados. Como o movimento deixa de ser sensível, são necessários botões para iniciar, interromper e abortar o ensaio. Antes de se dar início aos movimentos definidos, deve ainda estar disponível o botão para se aceder à pré-carga. Durante o ensaio, esse botão deixa de estar ativo.

Quando o procedimento for terminado ou abortado, neste tipo de sistemas, os dados retirados pelo autómato devem ser guardados, numa localização escolhida pelo utilizador. Desta forma, o botão “Resultados” ficará visível. A figura 4.26 é um exemplo do painel deste procedimento.



Figura 4.26 - Menu “Executar Ensaio”.

4.4 Registo de dados

Um dos grandes objetivos a alcançar com o desenvolvimento de sistemas de ensaio, para além dos motivos já referidos anteriormente, é a possibilidade de se poderem obter e analisar com grande rigor e confiabilidade os dados obtidos. De facto, a manipulação da informação retirada durante a execução de um ensaio e até mesmo do modo de monitorização, permitem entender qual o comportamento de um provete face às solicitações a que foi sujeito durante o ensaio. Desta forma, é importante que o *software* tenha a capacidade para gravar a informação recolhida, de modo que esta esteja acessível ao utilizador no final de uma monitorização ou procedimento de ensaio, caso este assim o deseje.

Neste sistema flexível, propõe-se a comunicação entre o autómato e a aplicação *Microsoft Excel*, para que sejam guardados os dados. A informação inserida no *Excel*, deve ser apresentada ao utilizador de forma organizada. Por isso, sugere-se a separação por colunas dos valores recolhidos pelo transdutor de posição, pela célula de carga e por eventuais transdutores auxiliares que sejam adicionados. Em cada documento deve ainda estar associada a data e a hora em que cada dado foi recolhido, o tempo total de duração do procedimento em causa e o utilizador que realizou o ensaio. Para que o ficheiro fique corretamente definido, é importante registar, ainda, o nome do ensaio que foi executado, bem como os eixos que se utilizaram e as trajetórias que foram definidas para serem realizadas. Posteriormente, o ficheiro deve, automaticamente, elaborar gráficos para cada variável lida em função do tempo e indicar as zonas de controlo em posição, em velocidade e em força.

Caso sejam ensaiados mais do que um eixo, a informação de cada um deve ser colocada em diferentes páginas do *Excel*, dado que estes também apresentam um comando e controlo independentes.

5 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

5.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação consistiu na elaboração de uma solução para uma máquina de ensaios mecânicos envolvida pelos requisitos atuais da indústria. Como foi estudado no decorrer deste documento, o desenvolvimento tecnológico e, conseqüentemente, o surgimento de novas soluções, tem sido um fator importante para a constante mudança de perspectiva do que realmente é importante num mecanismo. A passagem pela quarta revolução industrial tem vindo a atribuir relevância a conceitos como flexibilidade, modularidade e configurabilidade. E é com o intuito de acompanhar esta evolução que se procedeu ao estudo de novas soluções para as máquinas de ensaio.

A aplicação dos conceitos anteriores no estudo feito, ao longo deste documento, permitiu iniciar a conceção de um sistema de ensaios flexível muito satisfatório, para os objetivos propostos, inicialmente. Todo o processo de atualização tecnológica da máquina de ensaios consistiu na implementação não apenas dos conceitos que regem a atualidade industrial, mas também de meios de comando e controlo, instrumentação e segurança de última geração.

Todas as alterações estruturais, elétricas e de programação resultaram em soluções para o sistema, bem mais eficientes energeticamente relativamente às máquinas tradicionais. A flexibilidade do sistema, muito influenciada pela modularidade proposta através da divisão do mecanismo em módulos, permite o “reaproveitamento” desses módulos para inúmeras aplicações. A facilidade com que estes se conseguem conectar (ligações por fichas fêmea-macho) favorece a intermutabilidade dos eixos e das unidades energéticas.

Por outro lado, a conceção de um quadro elétrico abrangente a todas as soluções apresentadas, mais uma vez reforça a capacidade de adaptação face aos diferentes ensaios que se perspetivavam para o sistema de ensaios. De acrescentar que este suporta, tanto eletricamente como estruturalmente, soluções com apenas um eixo, dois eixos, *soft starter* ou variador de velocidade. O armário concebido consegue satisfazer desde aplicações com o mínimo de componentes até às aplicações que exigem a capacidade máxima do sistema.

A implementação de um autómato acoplado a módulos de expansão de entradas e saídas analógicas e digitais, mas também a módulos *Ethernet*, permite que o mecanismo tenha não só novas capacidades no que toca ao controlo de posição, velocidade e força, mas também, que acompanhe a evolução ao nível das comunicações. De acrescentar que a comunicação do autómato, por exemplo via *Ethernet*, até um servidor de base de dados é uma solução bastante satisfatória para a situação analisada neste estudo. O conceito de flexibilidade volta a ser aplicado e, de forma a tornar este *software* genérico às várias aplicações e configurações do sistema de ensaios é importante guardar toda a informação relativa às unidades energéticas, atuadores, válvulas e transdutores.

Por conseguinte, com este trabalho elaborou-se uma solução hidráulica completa para as máquinas de ensaio que, dependendo da aplicação, apenas necessita de ser reorganizada em termos de associação dos módulos constituintes e proceder à parametrização dos componentes, ao nível da programação. A solução apresentada tenta preencher uma necessidade dos sistemas hidráulicos, que, atualmente, representa uma grande vantagem para as tecnologias eletromecânicas.

Em jeito de conclusão, este trabalho apresenta uma solução bastante completa para um sistema de ensaios flexível, assente nos novos conceitos industriais, utilizando componentes elétricos de última geração e recorrendo a uma arquitetura de *software* abrangente a todas as alterações que poderão ser aplicadas no sistema. Desta forma, é de destacar a grande capacidade de tratamento de dados, de controlo e de comando das novas tecnologias, bem como a facilidade de implementação de um sistema flexível para execução de uma grande gama de ensaios.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, e tendo a consciência que existe forma de aperfeiçoar e completar o estudo aqui realizado, propõe-se a seguinte lista de trabalhos:

- Construção do armário elétrico e *software*, tendo como base a arquitetura aqui apresentada;
- Estabelecimento da comunicação entre o sistema de ensaios e um sistema de informação, para construção de uma base de dados;
- Elaboração da interface de comunicação com o utilizador;
- Implementação da capacidade de comando do sistema à distância e constante atualização do estado da máquina, através de um *smartphone* ou computador pessoal.
- Desenvolvimento de um sistema flexível de maior potência, para compreender as mudanças tanto elétricas como, possivelmente, de controlo que isso implicaria;
- Ensaio da capacidade de flexibilidade e adaptação do sistema desenvolvido face a unidades energéticas e eixos com diferentes características.

Bibliografia

- [1] P. O. A. Elisa Yumi Nakagawa, Frank Schnicke, Rafael Capilla, Thomas Kuhn, Peter Liggesmeyer, "Industry 4.0 Reference Architectures: State of the Art and Future Trends," p. 41 Accessed on: 06-04-2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241>
- [2] C. Automation. (07-04-2021). *Flexible Output Rates Through Modular Machine Concepts*. Available: <https://www.contexto-automation.com/modular-platform-system>
- [3] B. H. Hugh Boyes, Joe Cunningham, Tim Watson, "The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework," Cyber Security Centre, WMG, University of Warwick, Coventry, Computers in Industry 2018.
- [4] A. Zieger, "Modular Concept of Machining," Accessed on: 05-04-2021 Available: <https://www.industr.com/en/modular-concept-of-machining-2295710>
- [5] K. M. a. P. C. Nicolay Worren, "Modularity, Strategic Flexibility and Firm Performance: A study of the home appliance industry," Accessed on: 14-04-2021. doi: 10.1002/smj.276
- [6] J. Svetlík, "Modularity of Production Systems," Accessed on: 14-04-2021. doi: 10.5772/intechopen.90844 Available: <https://www.intechopen.com/books/machine-tools-design-research-application/modularity-of-production-systems>
- [7] C. Gonzalez, "What's the Difference Between Pneumatic, Hydraulic, and Electrical Actuators?," Accessed on: 24-05-2021 Available: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/linear-motion/article/21832047/whats-the-difference-between-pneumatic-hydraulic-and-electrical-actuators>
- [8] A. Dietrich. (2016, 19-05-2021). *Comparing Electric Rod Actuators and Hydraulic Cylinders*. Available: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/hydraulics/article/21832150/comparing-electric-rod-actuators-and-hydraulic-cylinders>
- [9] K.-E. Rydberg, Hydraulic Servo Systems: Linköping University, 2016, p. 111. [Online]. Available. Accessed on 06-05-2021.
- [10] L. M. Systems. (2017, 19-05-2021). *Linear Motors*. Available: <https://www.linearmotor.systems/linear-motors>
- [11] R. H. Maskrey and W. J. Thayer, "A Brief History of Electrohydraulic Servomechanisms," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, p. 7, 07-05-2021, 1978.
- [12] P. L. Andrighetto, "Posicionador eletro-hidráulico controlado por válvula proporcional direcional," Engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.
- [13] Vickers, *Elementos de hidráulica proporcional*. Vickers systems, 1998.
- [14] J. M. C. d. Silva, "Sistema Servo-Hidráulico de Ensaio Dinâmico de Estruturas - um caso de desenvolvimento," Mestre, Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

- [15] P. P. Machines. (2021). *Cuidados com os sistemas hidráulicos*. Available: <http://www.pmach.com.br/informacoes-tecnicas/cuidados-com-os-sistemas-hidraulicos>
- [16] S.-S. Intelligence, "Guia "Máquinas seguras"," SICK - Sensor Intelligence 2015, Accessed on: 24-05-2021.
- [17] P. H. G. C. KG, "Industrial Hydraulic Valves," P. H. G. C. KG, Ed., 6 ed, 2007.
- [18] PanelShop.com. (2019, 06-04-2021). *Inside Machines: PC vs. PLC - Comparing Control Options*. Available: <https://info.panelshop.com/blog/inside-machines-pc-vs-plc-comparing-control-options>
- [19] R. DAGGETT. (2013, 06-04-2020). *PC-Based Controls vs. PLC-Based Controls for Machine Automation*. Available: <https://www.bastiansolutions.com/blog/pc-based-controls-vs-plc-based-controls-for-machine-automation/>
- [20] B. Falke. (2020, 19-05-2021). *What are the differences between an Industrial PC and a HMI?* Available: <https://www.linkedin.com/pulse/what-differences-between-industrial-pc-hmi-bjoern-falke/>
- [21] G. E. Services. (2021, 09-04-2021). *Soft Starter vs. Star Delta Starter*. Available: <https://gesrepair.com/softstarter-vs-star-delta-starter/>
- [22] M. K. Johan Rees, Sören Kling, *Soft starter Handbook*: ABB AB, Cewe-Contro, 2010, p. 92. [Online]. Available. Accessed on 12-04-2021.
- [23] B. Riley. (2019, 09-04-2021). *Variable Frequency Drives Benefit Constant Speed Applications*. Available: <http://blog.parker.com/variable-frequency-drives-benefit-constant-speed-applications>
- [24] M. Lima, "Segurança de Máquinas e Equipamento," p. 17 Accessed on: 09-04-2021 Available: <http://www.dem.uminho.pt/People/mlima/TPM/Seguran%C3%A7a%20de%20M%C3%A1quinas%20e%20Equipamentos.pdf>
- [25] PILZ. (08-04-2021). *Relé de segurança*. Available: <https://www.pilz.com/pt-PT/support/knowhow/lexicon/articles/072106>
- [26] S. E. I. SAS, "Modicon M262 - IIoT-ready logic/motion controller for performance machines," vol. 2, S. Electric, Ed., ed, 2020.
- [27] S. Electric, "Modicon TMS - Expansion Module - Hardware Guide," S. Electric, Ed., ed, 2020.
- [28] P. A. F. d. Abreu, "Sistemas Eletromecânicos - Aparelhagem de comando e proteção," 2020.
- [29] A. Zeller. (2018, 31-05-2021). *Soluções de proteção de alimentação (UPS) personalizadas*.
- [30] G. Gabard. (2016, 07-04-2021). *Guidelines for panel builders: Delivery, assembly and installation of components*. Available: <https://blog.se.com/energy-management-energy-efficiency/2016/06/23/guidelines-panel-builders-delivery-assembly-installation-components/>
- [31] J. P. Q. Campos, "Apoio na Construção de Máquinas Industriais – Estágio na SIRMAF," Mestre, Engenharia Eletrotécnica – Área de Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas Industriais, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2017.
- [32] B. Inc. (2012). *The Business Benefits of Ethernet on the Plant Floor* Available: <https://www.automationworld.com/products/networks/article/13307304/the-business-benefits-of-ethernet-on-the-plant-floor>
- [33] A. Martinez. (2015). *Advantages of Ethernet Devices in the Industrial World*. Available: <https://www.northwindts.com/advantages-ethernet-devices-industrial-world/>
- [34] *Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*, 2015.

ANEXO A: Esquema Elétrico

Neste anexo são apresentados os esquemas elétricos desenvolvidos para um sistema de ensaios à sua capacidade máxima, com utilização de dois eixos e uma unidade energética do tipo II. Para a unidade energética do tipo III o *soft starter* seria substituído por um variador de velocidade e seria retirado o uso da válvula limitadora proporcional de pressão. Caso se pretendesse usar uma central hidráulica do tipo I não existiria *soft starter* nem variador. As ligações ao motor teriam de ser feitas de tal forma que permitissem o arranque estrela-triângulo, para que a corrente necessária seja menor comparativamente ao arranque direto. Por outro lado, não seria utilizada a válvula limitadora proporcional de pressão, os transdutores de temperatura e de pressão.

Esquema ElétricoV3

FlexyTester

0	23/03/2021	Adriana Oliveira	
REV.	DATE	NAME	CHANGES
			REVISION
			0
			SCHEME
			01

1-DynaTester

Desenho	Descrição do livro	Função	Localização	Revisão	Data	Criado por	Pasta	Descrição da pasta
01	Folha de rosto	=F1	+1	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
02	Lista de desenhos	=F1	+1	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
03	Esquema de ligação da linha	=F1	+9	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
04	Q1_Quadro de potência	=F1	+0	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
05	Q1-Atuações Internas e transdutores de CH	=F1	+2	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
06	Q1-Monitorizações Digitais	=F1	+3	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
07	Q1-Atuações por relés	=F1	+4	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
08	Q1-Entradas Analógicas	=F1	+5	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
09	Q1-Entradas/Saídas Analógicas	=F1	+6	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
10	Q2-Caixa concentradora eixo 1	=F1	+7	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		
11	Q3-Caixa concentradora eixo 2	=F1	+8	0	23/03/2021	Adriana Oliveira		

FlexyTester

REVISION

0

SCHEME

02

CONTRACT:

LOCATION:

+1

Quadro Q1 - Relé de Segurança

REV.

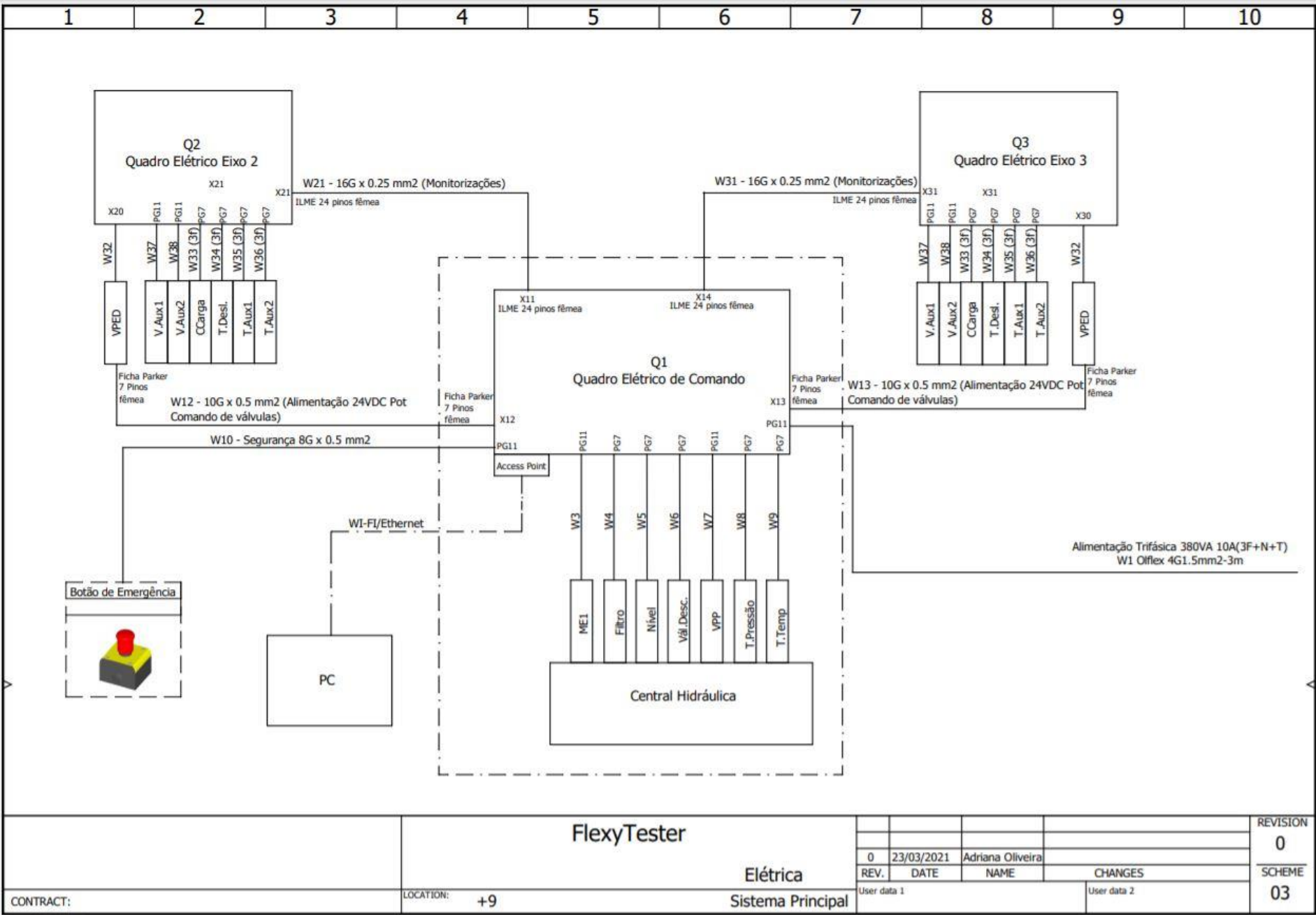
DATE

NAME

CHANGES

User data 1

User data 2



CONTRACT:

FlexyTester

Elétrica

Sistema Principal

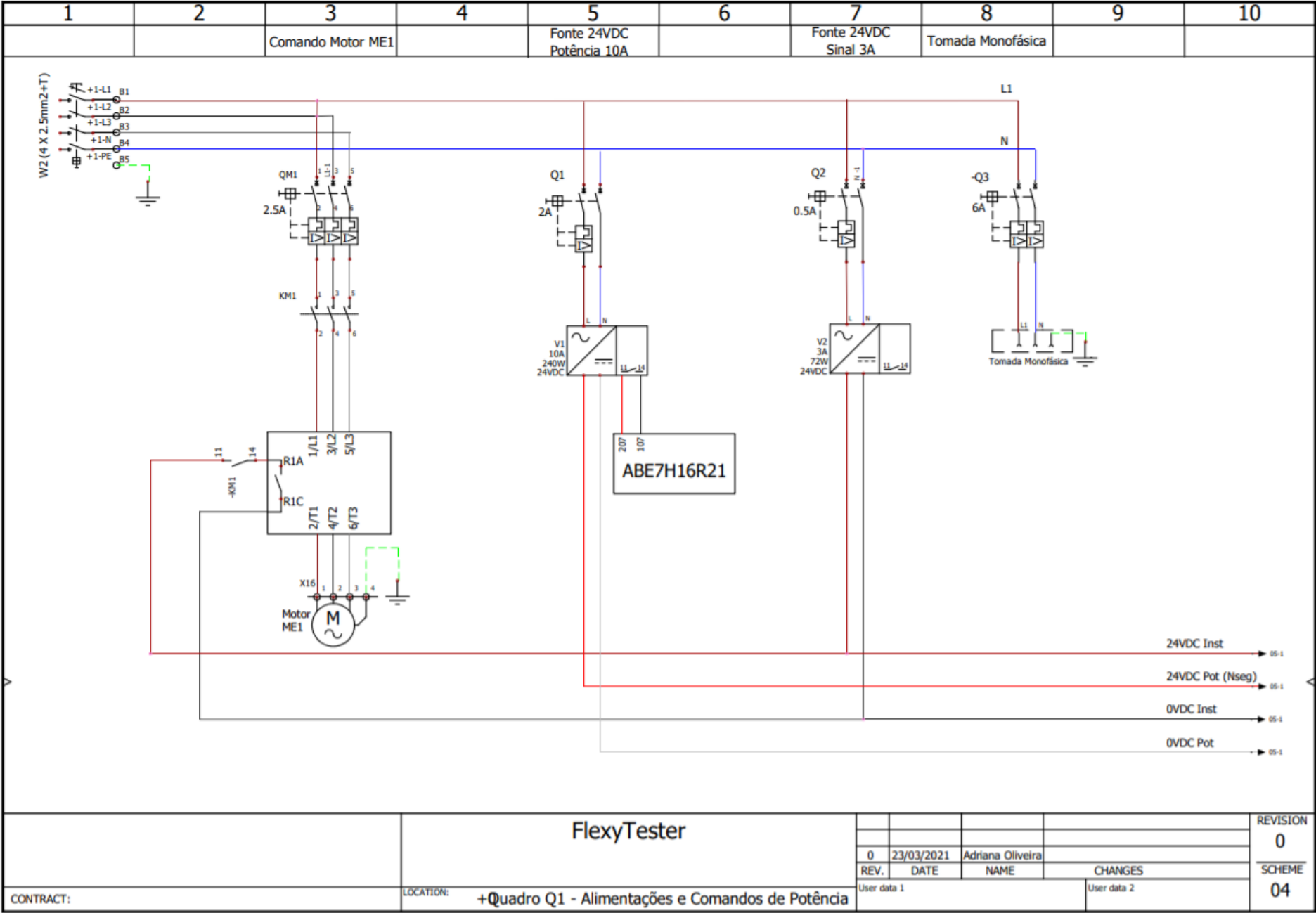
0	23/03/2021	Adriana Oliveira					
REV.	DATE	NAME	CHANGES				
User data 1			User data 2				

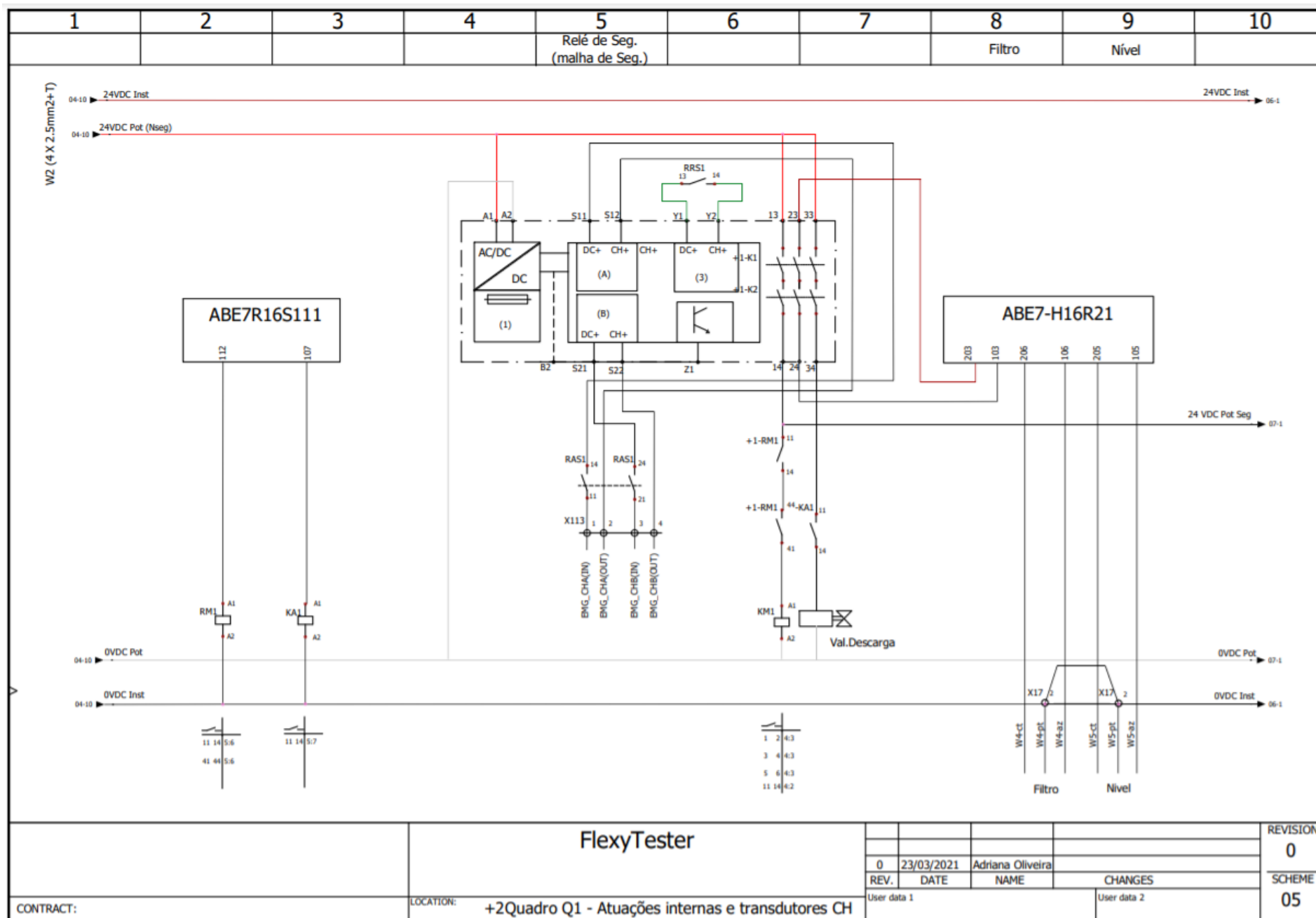
REVISION

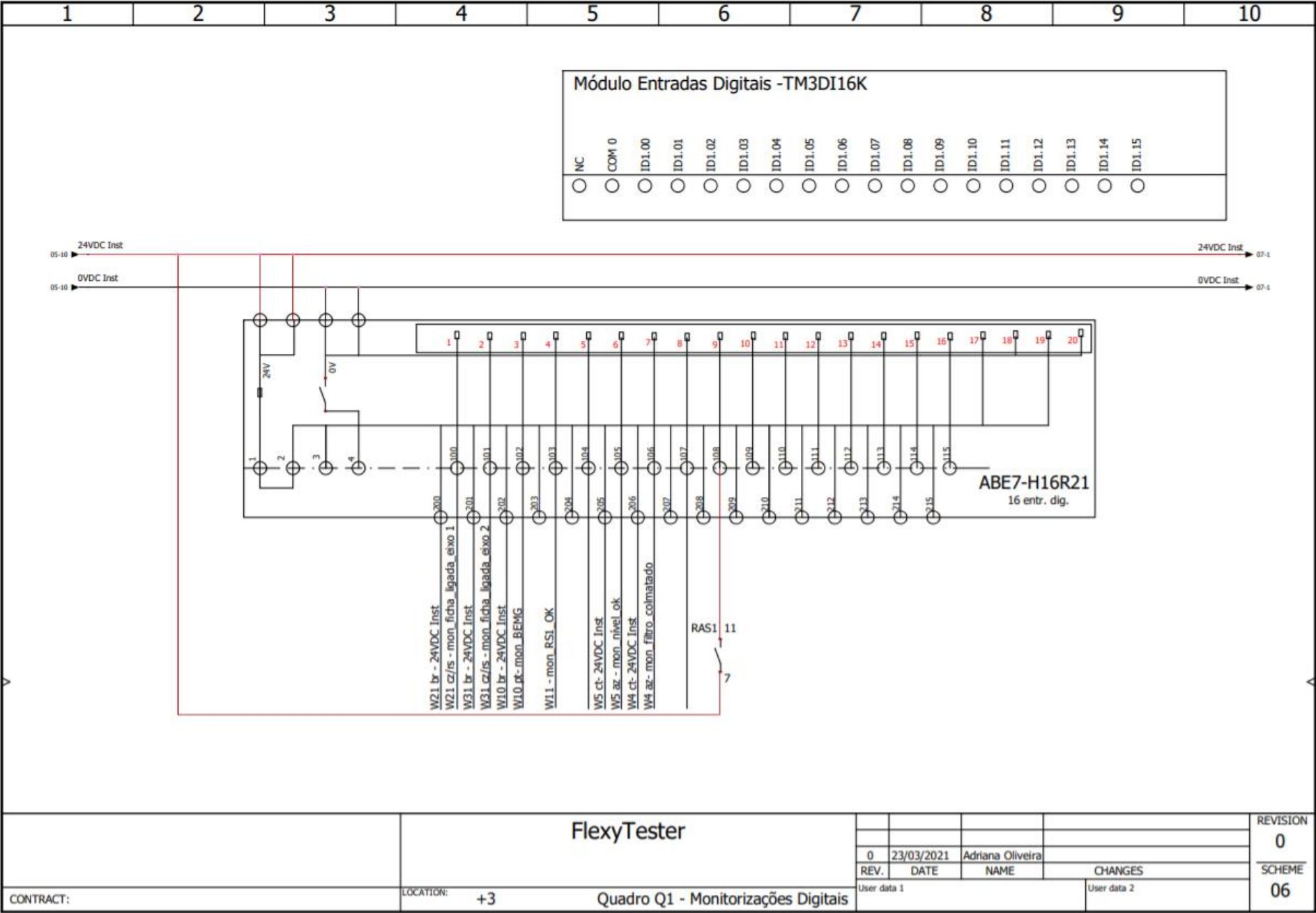
0

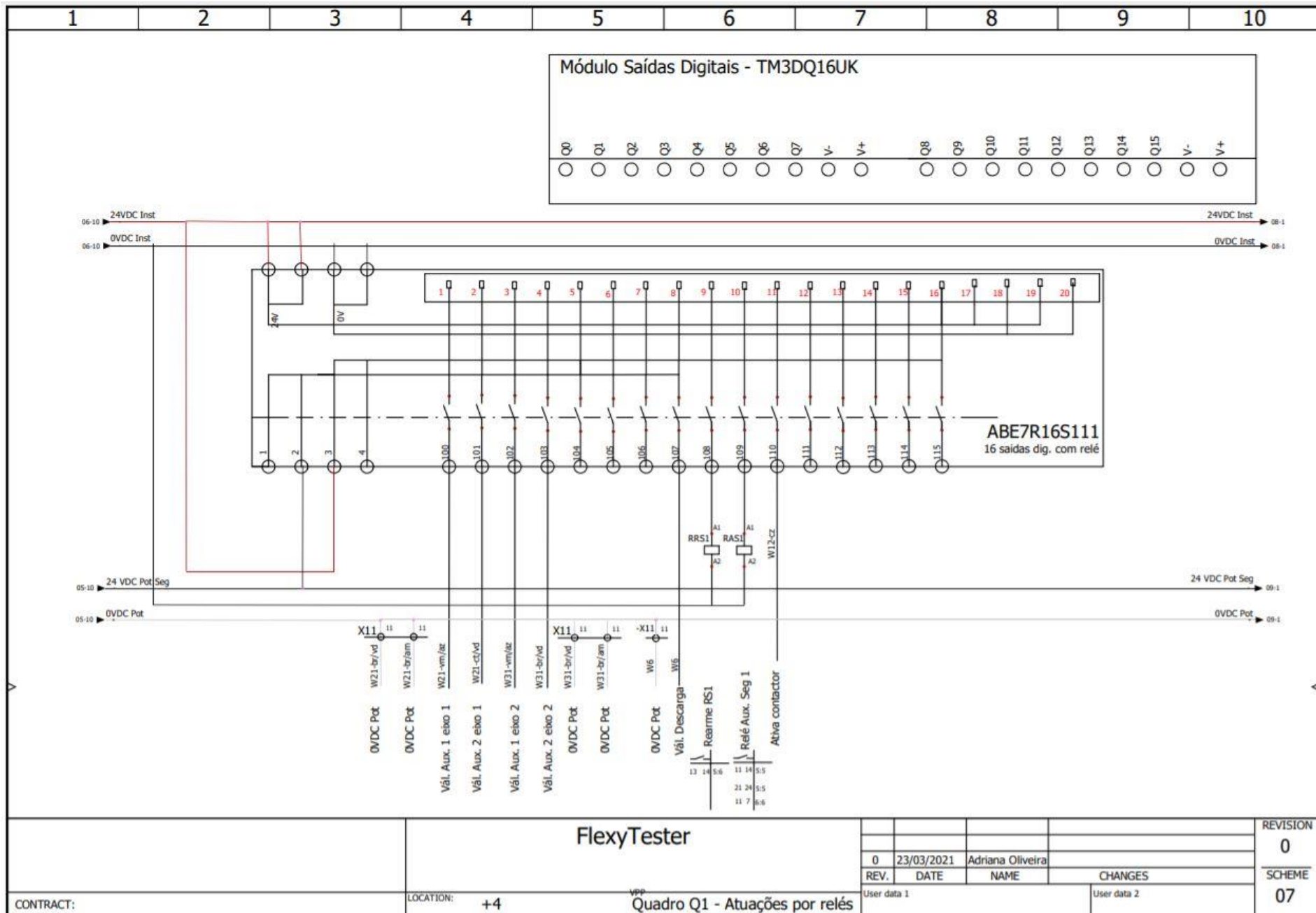
SCHEME

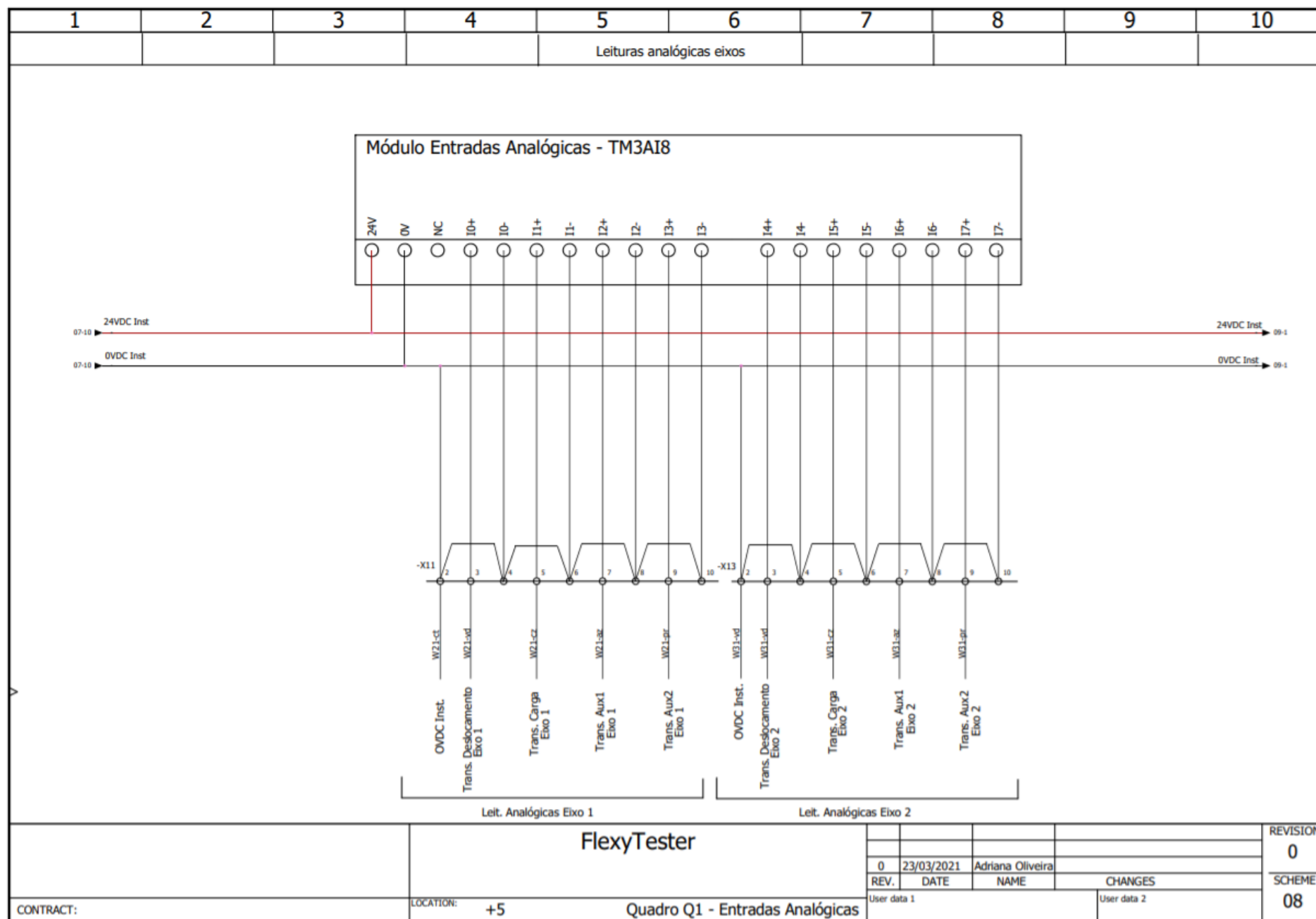
03

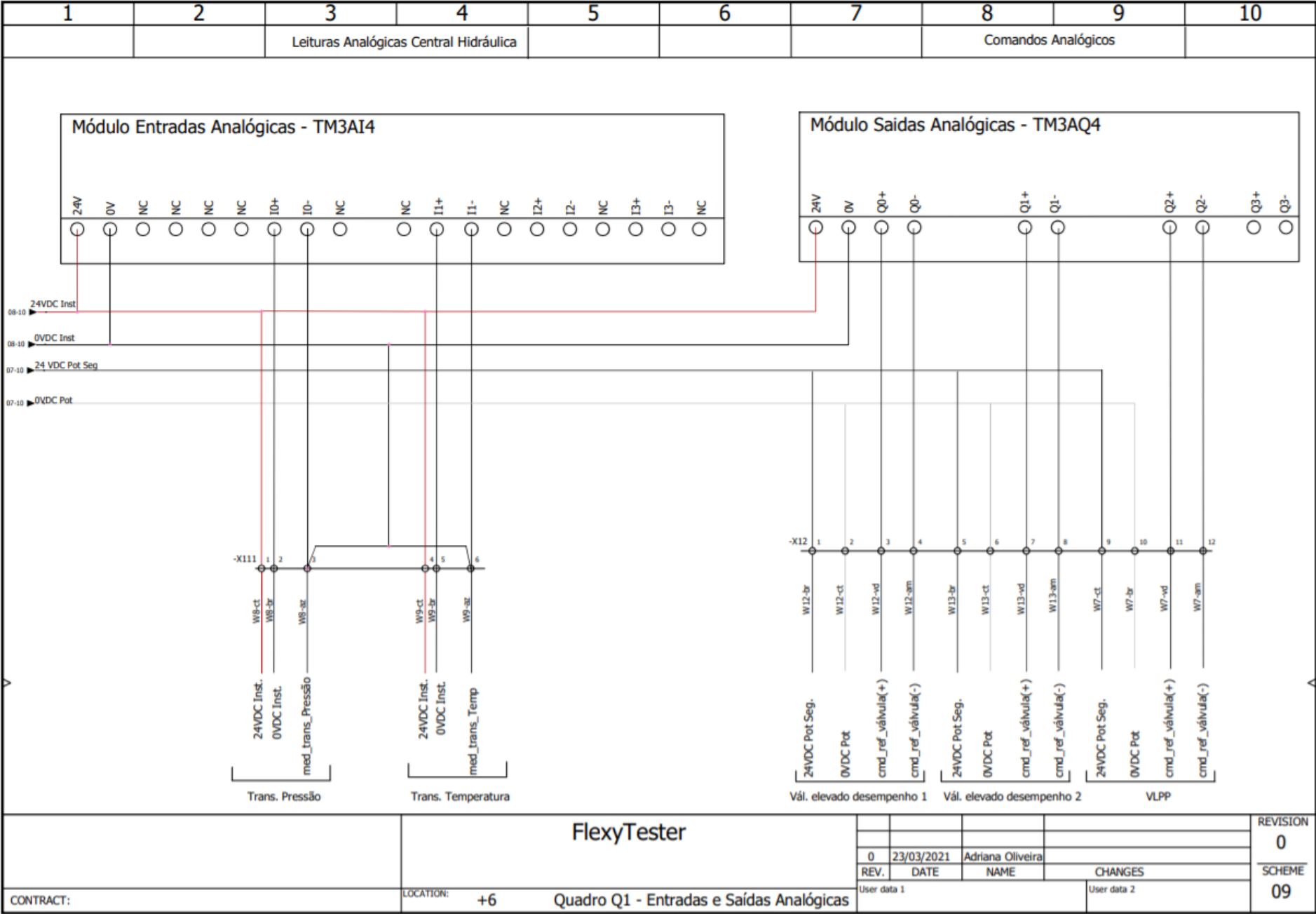


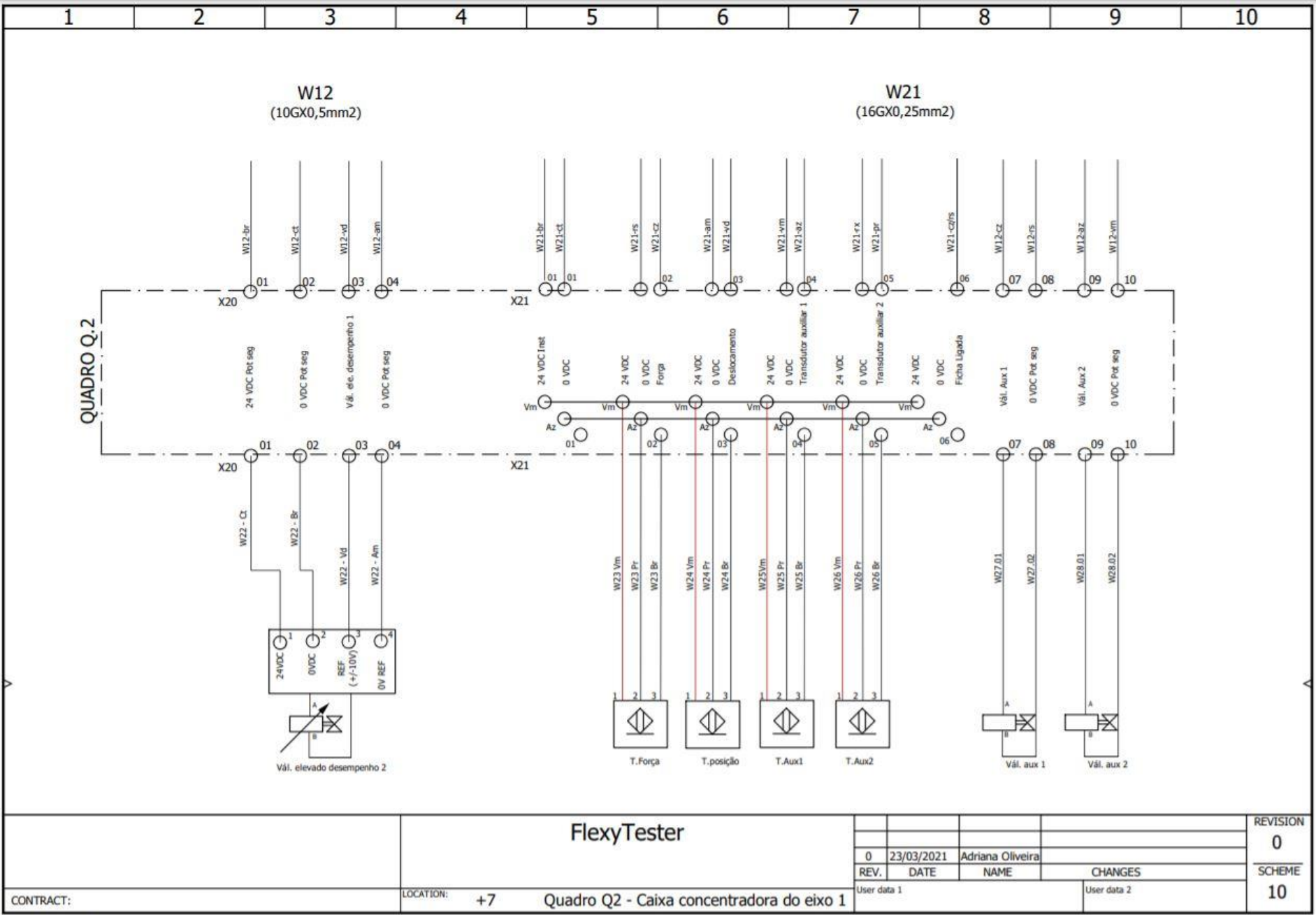










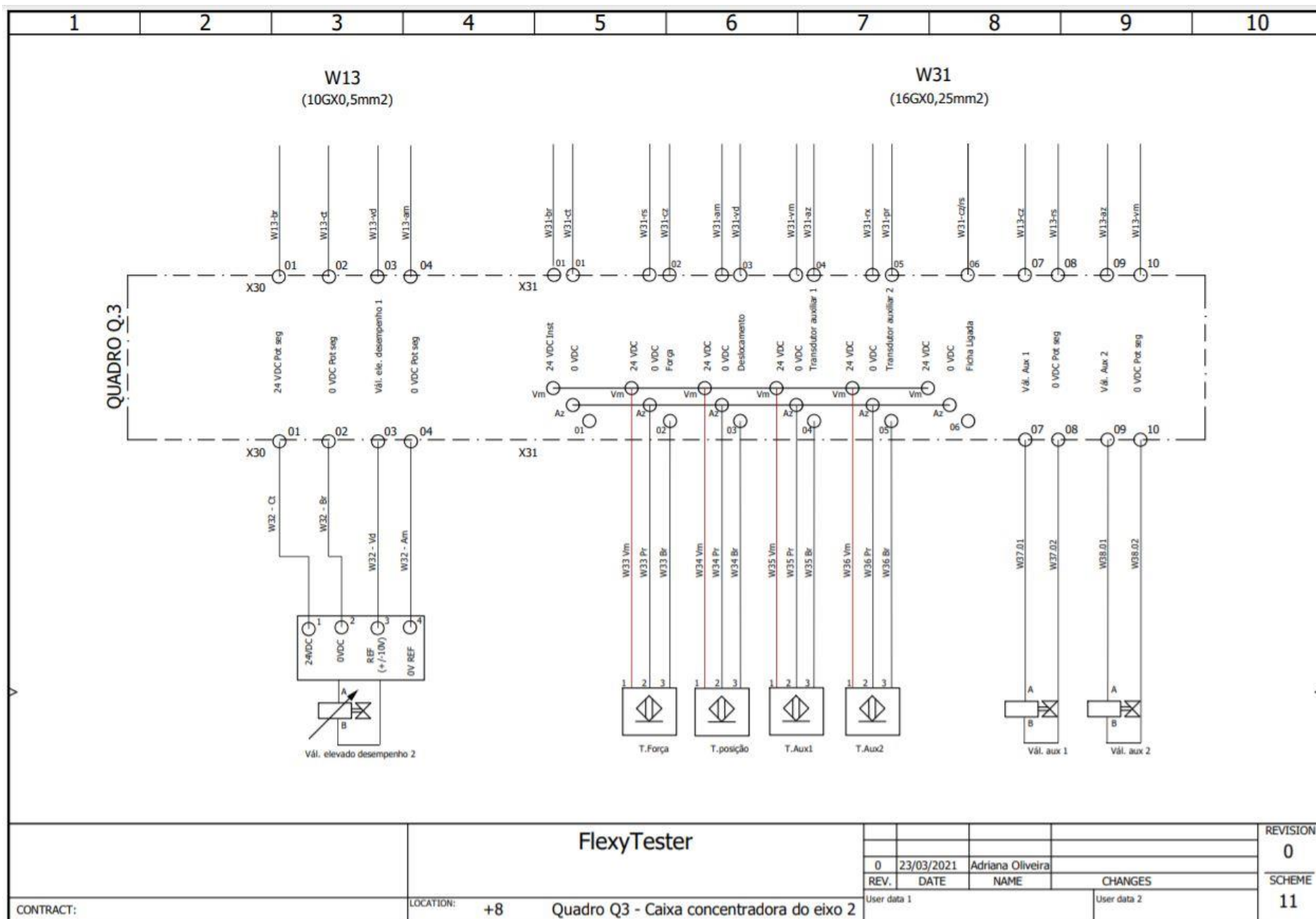


FlexyTester				REVISION	
				0	
0	23/03/2021	Adriana Oliveira			
REV.	DATE	NAME	CHANGES		
User data 1			User data 2		

CONTRACT:

LOCATION: +7

Quadro Q2 - Caixa concentradora do eixo 1



De forma a edificar os esquemas aqui apresentados ao estudo desenvolvido, será feita uma breve explicação do seu conteúdo. Na página 3 do esquema elétrico é apresentado o *layout* geral. O conceito de flexibilidade, nesta representação, é assegurado pelas ligações entre quadros feitas através de fichas. O quadro de comando, Q1, na sua constituição engloba dois cabos, designados por W21 e W31, que são conectados através de fichas, neste caso ILME 24 pinos, aos quadros dos eixos Q2 e Q3. Ao contrário do que acontece quando se utilizam buçins, o tipo de ligação aqui utilizada permite que facilmente se possa reconfigurar o *hardware* da máquina. O mesmo ponto de vista é aplicado às válvulas de elevado desempenho, comandadas e alimentadas pelos cabos W12 e W13, que se estabelecem comunicação com o quadro de comando por fichas Parker de 7 pinos. Na constituição final do sistema de ensaio deve estar inserido o quadro de comando, um ou dois quadros relativos aos eixos e uma unidade energética. Cada um destes quadros representa um módulo que pode variar quanto à capacidade de carga e quanto aos constituintes.

Analisando os esquemas elétricos, este inicia-se pela alimentação trifásica do quadro de comando. Caso o sistema não apresente curto-circuitos, nem sobrecargas, os disjuntores não disparam e alimenta-se as fontes de potência e de instrumentação e a tomada monofásica. A tensão de saída da fonte de potência não deve alimentar diretamente as válvulas do circuito hidráulico pois, dessa forma, não é assegurada a segurança do sistema. Por este motivo, nas atuações internas, página 5 dos esquemas, os 24V de potência são obrigados a atravessar o relé de segurança. Em caso de ser detetada alguma situação de emergência, este interrompe o seu circuito interno e as válvulas deixam de ser alimentadas ficando na sua posição de repouso. Para ligar o motor elétrico deve ser energizado o relé RM1 que, por sua vez, energizará os solenoides do contactor, KM1. Assim, o *soft starter* também é alimentado e o motor inicia o seu arranque de acordo com a rampa definida, pelo utilizador.

A codificação utilizada nos esquemas elétricos para alguns componentes é apresentada na seguinte tabela.

Tabela A.1 - Componentes utilizados no esquema elétrico.

Código	Descrição
QM1	Disjuntor magneto-térmico do motor
Q1	Disjuntor magneto-térmico da FAP
Q2	Disjuntor magneto-térmico da FAI
Q3	Disjuntor magneto-térmico da tomada monofásica
KM1	Contactor do motor
ME1	Motor elétrico
V1	Fonte de alimentação de potência
V2	Fonte de alimentação de instrumentação
RAS1	Relé auxiliar de segurança
KA1	Relé auxiliar da válvula de descarga
RM1	Relé auxiliar do motor
RRS1	Rearme do relé de segurança

Os sinais analógicos representam sinais elétricos que variam ao longo do tempo, numa determinada gama de corrente ou tensão. Os transdutores como precisam de medir variáveis produzem sinais analógicos que, posteriormente, serão processados e convertidos pelos equipamentos que recebem essa informação como, por exemplo, os autómatos. Por outro lado, ainda neste grupo de sinais analógicos, inserem-se as válvulas proporcionais que dependendo do valor e do sinal da tensão que recebem vão deslocando a sua gaveta. Assim, conectados aos módulos de entrada e saída analógicos devem estar os sinais provenientes dos transdutores e aqueles que são enviados para as válvulas proporcionais, como acontece na tabela a.2.

Tabela A.2 – Ligações analógicas ao PLC.

Ligações ao PLC_2 Eixos e CH tipo 2	
Canal	Descrição
Entradas Analógicas	
EA 0.00	Transdutor de posição eixo 1
EA 0.01	Transdutor de força eixo 1
EA 0.02	Transdutor auxiliar 1 eixo 1
EA 0.03	Transdutor auxiliar 2 eixo 1
EA 0.04	Transdutor de posição eixo 2
EA 0.05	Transdutor de força eixo 2
EA 0.06	Transdutor auxiliar 1 eixo 2
EA 0.07	Transdutor auxiliar 2 eixo 2
EA 1.00	Transdutor de pressão
EA 1.01	Transdutor de temperatura
EA 1.02	Livre
EA 1.03	Livre
Saídas Analógicas	
SA 0.00	Comando Válvula (+) eixo 1
SA 0.01	Comando Válvula (+) eixo 2
SA 0.02	Variador de velocidade/ VLPPressão
SA 0.03	Livre

Os sinais digitais, contrariamente ao anteriores, apenas podem assumir dois valores. Desta forma, os componentes que os recebem ou enviam assumem, somente, dois estados. Os módulos de entrada e saída digitais, geralmente, são conectados às monitorizações e às válvulas que apenas assumem o estado de totalmente aberta ou totalmente fechada, como pode ser observado na tabela a.3.

Tabela A.3 - Ligações digitais ao PLC.

Entradas Digitais	
ED 0.00	Confirmação cabo ligado Eixo 1
ED 0.01	Confirmação cabo ligado Eixo 2
ED 0.02	Monitorização botão de emergência
ED 0.03	Monitorização relé de segurança
ED 0.04	Monitorização contactor/ <i>soft starter</i>
ED 0.05	Monitorização nível
ED 0.06	Monitorização Filtro
ED 0.07	Monitorização 24 VDC potência
ED 0.08	Monitorização relé aux. Seg1
ED 0.09	Livre
ED 0.10	Livre
ED 0.11	Livre
ED 0.12	Livre
ED 0.13	Livre
ED 0.14	Livre
ED 0.15	Livre
Saídas Digitais	
OD 0.00	Válvula auxiliar 1 eixo 1

Desenvolvimento de um controlador flexível para um servo sistema hidráulico

OD 0.01	Válvula auxiliar 2 eixo 1
OD 0.02	Válvula auxiliar 1 eixo 2
OD 0.03	Válvula auxiliar 2 eixo 2
OD 0.04	Livre
OD 0.05	Livre
OD 0.06	Livre
OD 0.07	Válvula descarga
OD 0.08	Rearme_RS1
OD 0.09	Com_EMG_PLC(RAS1)
OD 0.10	Contactores do motor
OD 0.11	Livre
OD 0.12	Livre
OD 0.13	Livre
OD 0.14	Livre
OD 0.15	Livre

ANEXO B: Ligações entre os quadros elétricos

Muitas das vezes, a informação relativa ao funcionamento do sistema necessita de ser trocada entre os quadros. Como todos os comandos e monitorizações passam pelo cérebro do sistema, o autómato, é fundamental que o quadro de comando estabeleça comunicação com todos os quadros referentes aos eixos utilizados e unidades energéticas. Essa troca de informação pode ser feita por cablagem, técnica mais antiga, ou pelos novos protocolos de comunicação como *Ethernet/Ip*, *Modbus*, entre outros. Porém, neste projeto ambicionou-se dar continuidade à cablagem e, posteriormente, projetar as condições necessárias para se fazer o *update* nas comunicações, caso seja favorável.

As tabelas que se seguem apresentam informação relativas ao quadro de comando e quadros dos eixos. Trata-se de um complemento aos esquemas elétricos que descreve todos os sinais que devem ser trocados e codifica os bornes de ligação e os cabos responsáveis pelo transporte desses sinais. Este procedimento, mais uma vez, é feito com o objetivo de reduzir a probabilidade de ocorrência de erros durante a montagem do circuito elétrico e facilitar a leitura e compreensão dos esquemas.

Uma boa prática para a codificação dos cabos será utilizar os números dos quadros aos quais estes se ligam. Ou seja, se o sinal do cabo tiver origem no quadro 1 e for transferido até ao quadro 2, então o cabo será o W12. Por outro lado, os cabos que apenas conectam com um quadro, provenientes, por exemplo da central hidráulica, devem iniciar a sua codificação com o respetivo número desse quadro, como W1.1. Estas regras de codificação acabam por também fazerem sentido quando aplicados aos bornes, pelo que um borne no quadro 1 deverá ser codificado como X11. Não deve haver repetição de códigos de bornes e de cabos pois, dessa forma, não poderia ser feita a distinção entre as ligações.

Tabela B.1 - Ligações ao quadro elétrico de comando.

Q1 - Quadro elétrico de comando					
Origem	Cabo	Bucim	Borne	Função	Sinal elétrico
Q2 - Quadro elétrico do eixo 1	W21-br	16G x 0.25 mm2 - Ficha Ilme 24 pinos fêmea	ABE(R21)200	24 VDC Inst.	24 VDC Sinal Digital
	W21-ct		X11.02	O VDC Inst.	0 VDC Sinal Digital
	W21-vd		X11.03	med_trans_posição	0-10V
	W21-am		X11.04 (shunt 11.02)	0VDC_trans_posição	0 VDC Sinal Digital
	W21-cz		X11.05	med_CC	0-10V
	W21-rs		X11.06 (shunt 11.04)	0 VDC_CC	0 VDC Sinal Digital
	W21-az		X11.07	med_trans_aux1	0-10V
	W21-vm		X11.08 (shunt 11.06)	0VDC med_trans_aux1	0 VDC Sinal Digital
	W21-pr		X11.09	med_trans_aux2	0-10V
	W21-rx		X11.10 (shunt 11.08)	0VDC med_trans_aux2	0 VDC Sinal Digital
	W21-cz/rs		ABE(R21)100	mon_ficha_ligada	0-10V
	W21-vm/az		ABE100 (S111)	cmd_ref_válvula_auxiliar_1	24 VDC Potência
	W21-br/vd		X11.11	0VDC val_aux2	0 VDC Potência
	W21-ct/vd		ABE101 (S111)	cmd_ref_válvula_auxiliar_2	24 VDC Potência
	W21-br/am		X11.11	0VDC val_aux2	0 VDC Potência
				malha	terra
	W12-br	10G x 0.5 mm2 - Parker 7 pinos fêmea	X12.01	24 VDC Pot Seguro	24 VDC Potência
	W12-ct		X12.02	O VDC Pot	0 VDC Potência
	W12-vd		X12.03	cmd_ref_válvula (+)	[-10VDC; +10VDC]
	W12-am		X12.04	cmd_ref_válvula (-)	0 V anal
				malha	terra
Q3 - Quadro elétrico do eixo 2	W31-br	16G x 0.25 mm2 - Ficha Ilme 24 pinos fêmea	ABE(R21)201	24 VDC Inst.	24 VDC Sinal Digital
	W31-ct		X13.02	O VDC Inst.	0 VDC Sinal Digital
	W31-vd		X13.03	med_trans_posição	0-10V
	W31-am		X13.04 (shunt 13.02)	0VDC_trans_posição	0 VDC Sinal Digital
	W31-cz		X13.05	med_CC	0-10V
	W31-rs		X13.06 (shunt 13.04)	0 VDC_CC	0 VDC Sinal Digital
	W31-az		X13.07	med_trans_aux1	0-10V
	W31-vm		X13.08 (shunt 13.06)	0VDC med_trans_aux1	0 VDC Sinal Digital
	W31-pr		X13.09	med_trans_aux2	0-10V
	W31-rx		X13.10 (shunt 13.08)	0VDC med_trans_aux2	0 VDC Sinal Digital
	W31-cz/rs		ABE(R21)101	mon_ficha_ligada	-
	W31-vm/az		ABE102 (S111)	cmd_ref_válvula_auxiliar_1	24 VDC Potência
	W31-br/vd		X11.11	0VDC val_aux2	0 VDC Potência
	W31-ct/vd		ABE103 (S111)	cmd_ref_válvula_auxiliar_2	24 VDC Potência
	W31-br/am		X11.11	0VDC val_aux2	0 VDC Potência
				malha	terra
	W13-br	10G x 0.5 mm2 - Parker 7 pinos fêmea	X12.05	24 VDC Pot Seguro	24 VDC Potência
	W13-ct		X12.06	O VDC Pot	0 VDC Potência
	W13-vd		X12.07	cmd_ref_válvula(+)	[-10VDC; +10VDC]
	W13-am		X12.08	cmd_ref_válvula(-)	0 V anal
				malha	terra
Alim. Trifásica	W1-ct	4 x 2.5mm2+TPG11	B1	L1 - alimentação geral	230 V AC
	W1-pt		B2	L2 - alimentação geral	230 V AC
	W1-cz		B3	L3 - alimentação geral	230 V AC
	W1-az		B4	Neutro	0 VAC
	W1-vd/am		B5	Malha	Terra
ME1 (Vfreq.)	W3-ct	3x1.5 mm2+malha PGI1	X16.01	Fase U1	24VDC pot
	W3-pt		X16.02	Fase V1	0 VDC Pot.
	W3-cz		X16.03	Fase W1	-
	W3-vd/am			Terra	terra

Colmatagem do filtro	W4-ct	PG7	ABE(R21)206	24 VDC Inst.	24 VDC digital
	W4-pt		X17.02 az	0VDC Inst.	0VDC
	W4-az		ABE(R21)106	mon_filtro_colmatado	-
I.Nível	W5-ct	PG7	ABE(R21)205	24 VDC Inst.	24 VDC digital
	W5-pt		X17.02 az	0VDC Inst.	0VDC
	W5-az		ABE(R21)105	mon_nível_ok	-
Válvula descarga	W6	PG7		24 VDC Pot seguro	24 VDC Potência
	W6		X11.1	0VDC Pot	0 VDC Potência
	W6		ABE107 (S111)	cmd_valvula_descarga	-
VLPP	W7-ct	PG11	X12.09	24 VDC Pot seguros	24 VDC Potência
	W7-br		X12.10	OVDC Pot seguros	0 VDC Potência
	W7-vd		X12.11	Ref VLPP (+)	0-10V
	W7-am		X12.12	Ref VLPP (-)	0V anal
	W7-terra			Terra	Terra
Trans_Pressão	W8-ct	PG7	X111.01	24VDC Inst.	24 VDC digital
	W8-az		X111.02	med_trans_pressão	0 VDC
	W8-br		X111.03	0VDC Inst.	0-10V
Trans_Temp	W9-ct	PG7	X111.04	24VDC Inst.	24 VDC digital
	W9-az		X111.05	med_trans_Temp	0 VDC
	W9-br		X111.06 (shunt X111.03)	0VDC Inst.	0-10V
Botão de emergência	W10-br	Segurança 8Gx0,5mm2 PG11	ABE(R21)202	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W10-pt		ABE(R21)102	mon_BEMG	0-24V Digital
	W10-az		X113.01	EMG_CHA(IN)	Seg (RS1)
	W10-ct		X113.02	EMG_CHA(OUT)	Seg (RS1)
	W10-cz		X113.03	EMG_CHB(IN)	Seg (RS1)
	W10-vm		X113.04	EMG_CHB(OUT)	Seg (RS1)
				malha	Terra
UPS	W14		X117.01	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W14		X117.02	Mon.UPS OK	

Tabela B.2 - Ligações ao quadro do eixo 1.

Q2 - Quadro elétrico do eixo 1					
Origem	Cabo	Bucim	Borne	Função	Sinal elétrico
Q1- Quando elétrico de interface	W12-br	10G x 0.5 mm2 – Parker 7 pinos fêmea		24 VDC Pot Seguro	24 VDC Potência
	W12-ct			O VDC Pot	0 VDC Potência
	W12-vd			cmd_ref_válvula(+)	[-10VDC; +10VDC]
	W12-am			cmd_ref_válvula(-)	0V anal
				malha	terra
	W21-br	16G x 0.25 mm2 - Ficha Ilme 24 pinos fêmea	X21.01 Vm	24 VDC Inst.	24 VDC Sinal Digital
	W21-ct		X21.01 Az	O VDC Inst.	0 VDC Sinal Digital
	W21-vd		X21.02	med_trans_posição	0-10V
	W21-am		X21.02 Az	0VDC_trans_posição	0 VDC Sinal Digital
	W21-cz		X21.03	med_CC	0-10V
	W21-rs		X21.03 Az	0 VDC_CC	0 VDC Sinal Digital
	W21-az		X21.04	med_trans_aux1	0-10V
	W21-vm		X21.04 Az	0VDC med_trans_aux1	0 VDC Sinal Digital
	W21-pr		X21.05	med_trans_aux2	0-10V
	W21-rx		X21.05 Az	0VDC med_trans_aux2	0 VDC Sinal Digital
	W21-cz/rs		X21.06	med_ficha_ligada	-
	W21-vm/az		X21.07	cmd_ref_válvula_auxiliar_1	-
	W21-br/vd		X21.08	O VDC Pot	-
	W21-ct/vd		X21.09	cmd_ref_válvula_auxiliar_2	-
	W21-br/am		X21.10	O VDC Pot	-
				malha	terra
Válvula Elevado Desempenho Eixo 1	W22-ct		X20.01	24 VDC Pot Seguro	24 VDC Potência
	W22-br		X20.02	O VDC Pot	0 VDC Potência
	W22-vd		X20.03	Comando Válvula (+)	0-10V
	W22-am		X20.04	Comando Válvula (-)	0V anal
	Malha			Terra	Terra
CC	W23-vm	PG7	X21 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W23-pr		X21 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W23-br		X21.02	med_CC (0-10V)	0-10V
				malha	terra
Tx	W24-ct	PG7	X21 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W24-az		X21 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W24-br		X21.03	med_desl (0-10V)	0-10V
				malha	Terra
T.auxiliar 1	W25-ct	PG7	X21 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W25-az		X21 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W25-br		X21.04	med_Taux1 (0-10V)	0-10V
				malha	Terra
T.auxiliar 2	W26-ct	PG7	X21 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W26-az		X21 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W26-br		X21.05	med_Taux2 (0-10V)	0-10V
				malha	Terra
válvula auxiliar 1	W27 - 01		X21.07	cmd_ref_válvula_auxiliar_1	-
	W27 - 02		X21.08	0 VDC Pot	-
válvula auxiliar 2	W28 - 01		X21.09	cmd_ref_válvula_auxiliar_2	-
	W28 - 02		X21.10	0 VDC Pot	-

Tabela B.3 - Ligações ao quadro do eixo 2.

Q3 - Quadro elétrico do eixo 2					
Origem	Cabo	Bucim	Borne	Função	Sinal elétrico
Q1 - Quando elétrico de interface	W13-br	10G x 0.5 mm2 - Parker 7 pinos fêmea		24 VDC Pot Seguro	24 VDC Potência
	W13-ct			O VDC Pot	0 VDC Potência
	W13-vd			cmd_ref_válvula(+)	[-10VDC; +10VDC]
	W13-am			cmd_ref_válvula(-)	0 V anal
				malha	terra
	W31-br	16G x 0.25 mm2 – Ficha Ilme 24 pinos fêmea	X31.01 Vm	24 VDC Sinal	24 VDC Sinal Digital
	W31-ct		X31.01 Az	O VDC Sinal	0 VDC Sinal Digital
	W31-vd		X31.02	med_trans_posição	0-10V
	W31-am		X31.02 Az	0VDC_trans_posição	0 VDC Sinal Digital
	W31-cz		X31.03	med_CC	0-10V
	W31-rs		X31.03 Az	0 VDC_CC	0 VDC Sinal Digital
	W31-az		X31.04	med_trans_aux1	0-10V
	W31-vm		X31.04 Az	0VDC mon_trans_aux1	0 VDC Sinal Digital
	W31-pr		X31.05	med_trans_aux2	0-10V
	W31-rx		X31.05 Az	0VDC mon_trans_aux2	0 VDC Sinal Digital
	W31-cz/rs		X31.06	med_ficha_ligada	-
	W31-vm/az		X31.07	cmd_ref_válvula_auxiliar_1	-
	W31-br/vd		X31.08	O VDC Pot	-
	W31-ct/vd		X31.09	cmd_ref_válvula_auxiliar_2	-
	W31-br/am		X31.10	O VDC Pot	-
				malha	terra
Vál. Elevado Desempenho Eixo 1	W32-ct		X30.01	24 VDC Pot Seguro	24 VDC Potência
	W32-br		X30.02	O VDC Pot	0 VDC Potência
	W32-vd		X30.03	Comando Válvula (+)	0-10V
	W32-am		X30.04	Comando Válvula (-)	0V anal
	Malha			Terra	Terra
CC	W33-vm	PG7	X31 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W33-pr		X31 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W33-br		X31.02	med_CC (0-10V)	0-10V
				malha	terra
Tx	W34-ct	PG7	X31 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W34-az		X31 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W34-br		X31.03	med_desl (0-10V)	0-10V
				malha	Terra
T.auxiliar 1	W35-ct	PG7	X31 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W35-az		X31 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W35-br		X31.04	med_Taux1 (0-10V)	0-10V
				malha	Terra
T.auxiliar 2	W36-ct	PG7	X31 vm	24VDC Inst.	24VDC sinal digital
	W36-az		X31 az	0VDC Inst.	0VDC sinal digital
	W36-br		X31.05	med_Taux2 (0-10V)	0-10V
				malha	Terra
válvula auxiliar 1	W37 - 01		X31.07	cmd_ref_válvula_auxiliar_1	-
	W37 - 02		X31.08	0 VDC Pot	-
válvula auxiliar 2	W38 - 01		X31.09	cmd_ref_válvula_auxiliar_2	-
	W38 - 02		X31.10	0 VDC Pot	-

ANEXO C: *Layouts*

A seleção das dimensões do armário elétrico resultou da organização dos componentes, respeitando as regras enunciadas no tópico 3.8.1. Uma vez que se pretende obter um resultado final capaz de se adaptar às diferentes necessidades do sistema, foi fundamental conhecer as características de todos os dispositivos elétricos. Assim, foi feito um *layout* para cada situação considerada neste estudo.

O *layout* I é utilizado nas aplicações que apenas necessitam de um eixo, uma vez que está disponível somente uma fonte de potência de 10A, e para as unidades energéticas do tipo I ou II, pois utiliza-se um *soft starter* e não um variador de velocidade.

O segundo e terceiro *layouts* são aplicadas às mesmas situações. Permitem funcionar com a unidade energética do tipo III com comando de dois eixos. No primeiro caso, a partir do quadro elétrico da primeira situação acrescenta-se outra fonte de potência de 10A e retira-se o arrancador, colocando um variador de velocidade. No segundo caso, é também colocado um variador, porém não se faz uso da fonte de potência da primeira situação, mas sim de uma fonte de 20A. Optar por uma ou outra solução não apresenta qualquer impacto no funcionamento do sistema, pelo que a decisão partirá do balanço económico feito pelo próprio utilizador dos equipamentos.

Conclui-se, portanto, que escolher um armário de 600mm de largura, com 600mm de altura e 200 mm de profundidade, satisfaz todas as configurações e utilizações do sistema de ensaios flexível.

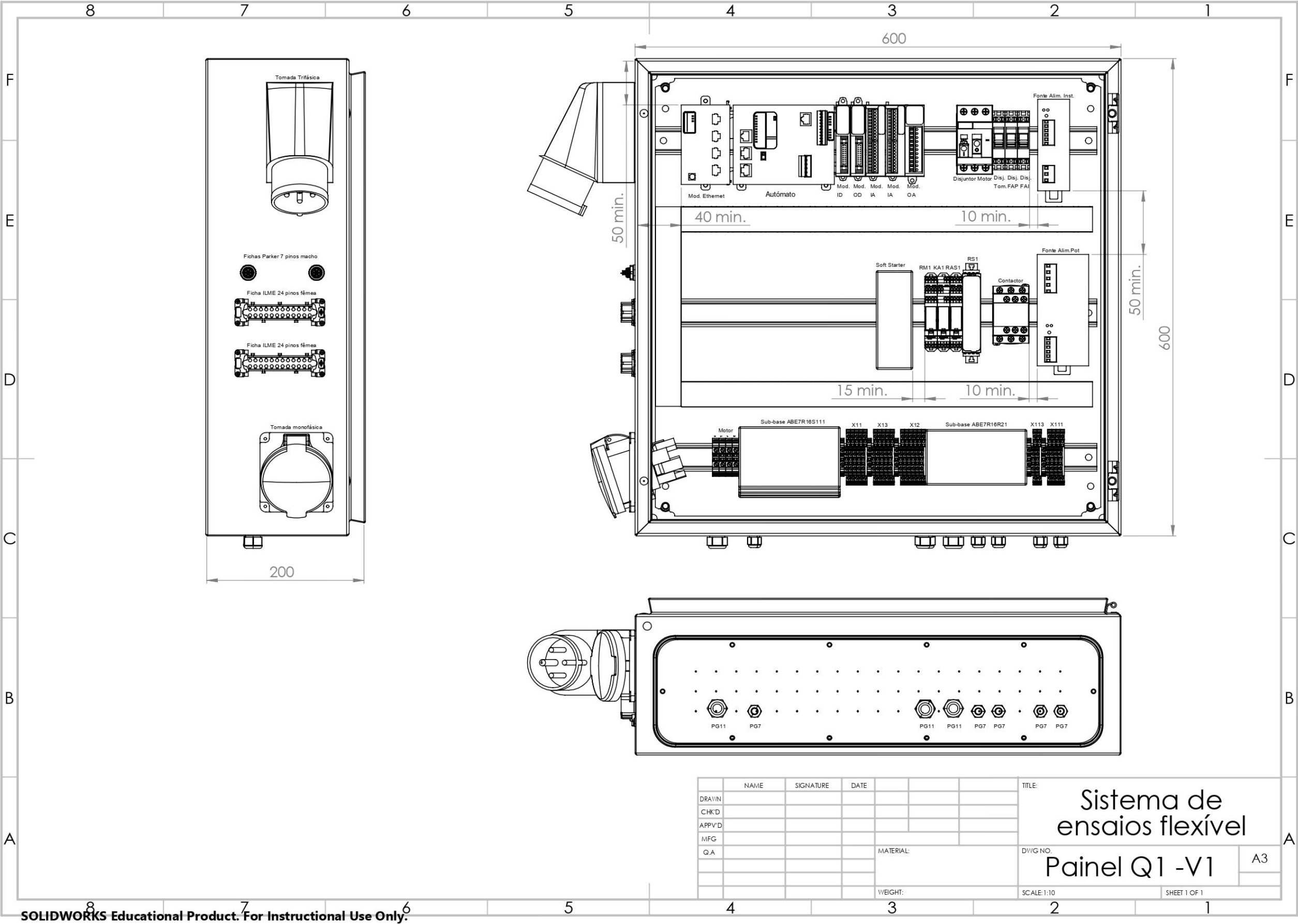


Figura C.1 - Layout do armário elétrico para a primeira situação.

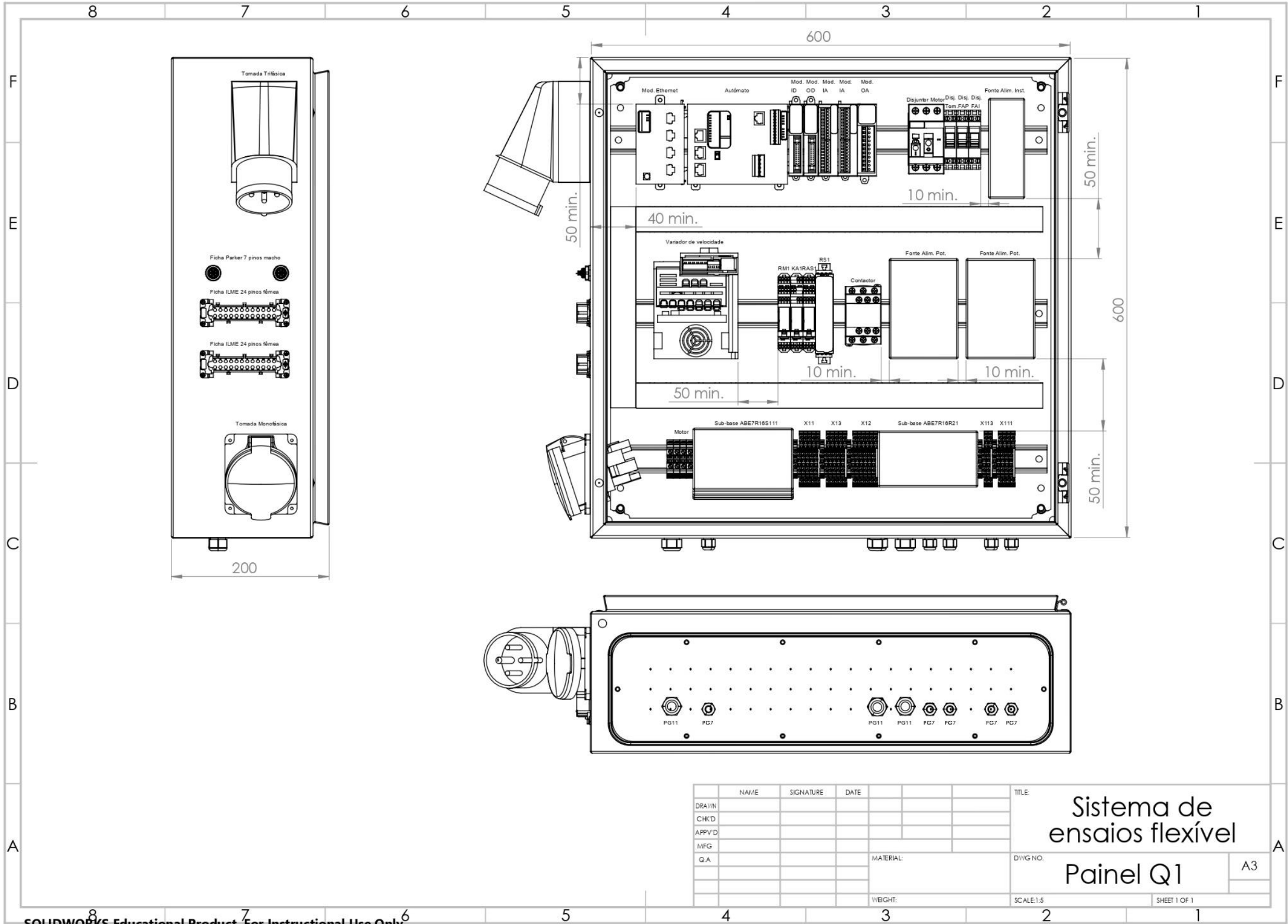


Figura C.2 - Layout do armário elétrico para a segunda situação.

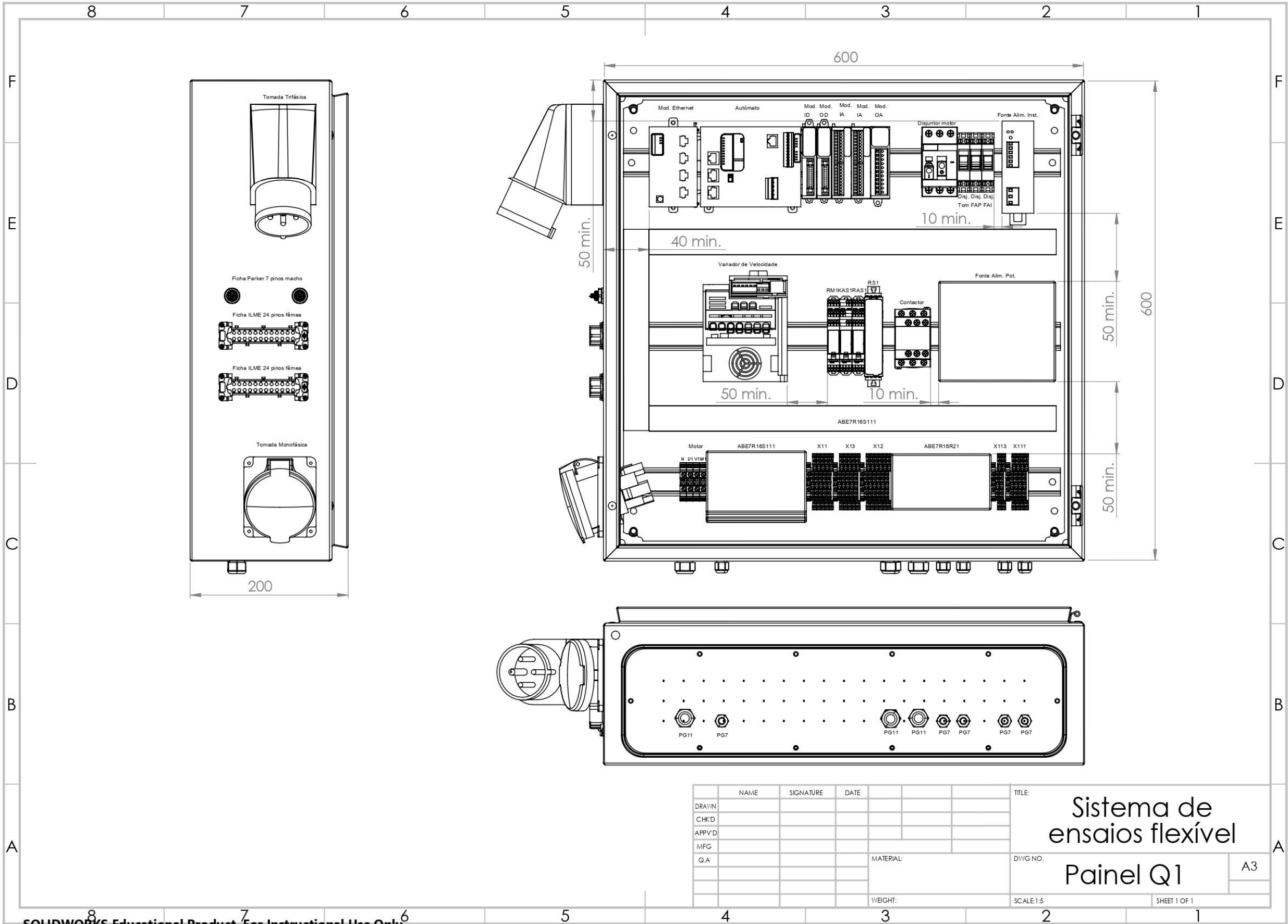


Figura C.3 - Layout do armário elétrico para a terceira situação.

ANEXO D: *Grafkets*/Mensagens

Neste anexo são apresentados os *grafkets* base dos modos de funcionamento manual, monitorização, pré-carga e ensaio. Embora no capítulo 4 tenham sido abordados os requisitos destes modos, a esquematização dos mesmos em *grafket* acaba por facilitar a compreensão por parte do programador.

Por outro lado, a comunicação da aplicação com o utilizador é outro tópico que deve ser considerado. Na verdade, é necessário que o servomecanismo dê a conhecer continuamente o seu estado para que, rapidamente, qualquer erro no sistema seja detetado e resolvido. É também de salientar que a manipulação da máquina é mais acessível quando essa comunicação é estabelecida. Assim, foi elaborada uma lista de mensagens, todas codificadas, para que, quando inseridas no *software*, permitirem ao utilizador entender os motivos das decisões tomadas pelo autómato ou pela própria programação.

Monitorização

A monitorização apenas pode ser iniciada se forem indicados quais os transdutores que se pretendem monitorizar e qual a frequência de aquisição dos dados. Caso alguma destas condições não seja verificada, o utilizador será informado através da mensagem correspondente a esse erro. A qualquer momento se pode interromper este comando. Porém, não é possível retomar ao processo de monitorização, a menos que se inicie um novo. Os procedimentos deste menu são representados no *grafket* da figura d.1.

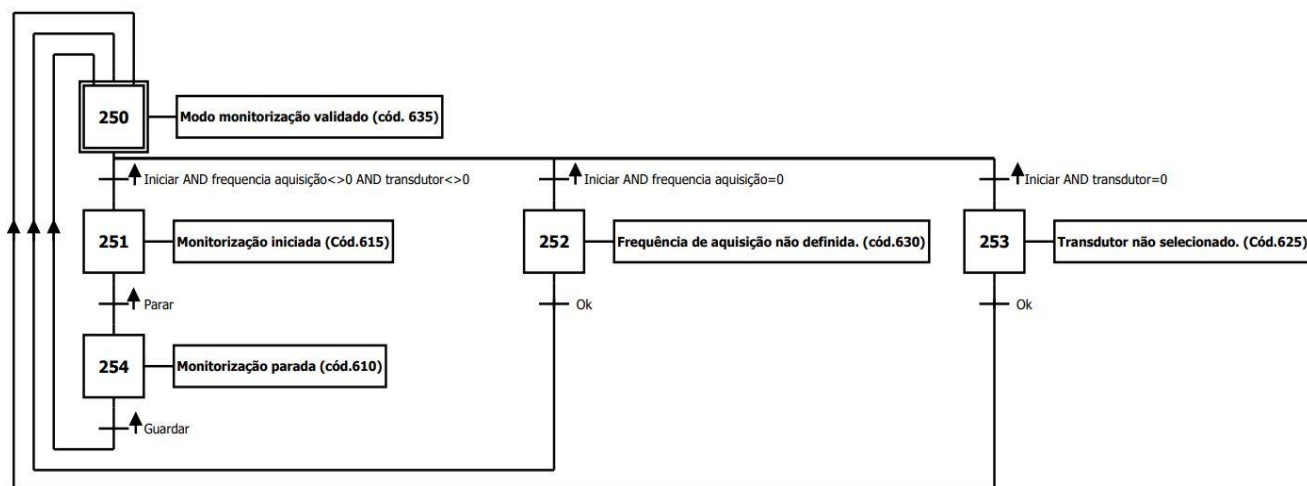


Figura D.1 - *Grafket* de funcionamento do modo de monitorização.

Modo Manual

O modo manual é um procedimento sensitivo e, por isso, o movimento de recuo ou avanço do atuador só acontece caso se pressione continuamente um dos botões disponíveis. Todavia, antes de se proceder para o comando do atuador é importante ligar a unidade energética e atribuir uma velocidade de deslocação ao servomecanismo. Antes de se desligar o grupo hidráulico deve-se certificar de que tanto a velocidade, como a pressão foram levadas a zero. Novamente, cada etapa do *grafcet* da figura d.2 apresentado corresponde a uma mensagem que deve ser mostrada na interface com o utilizador.

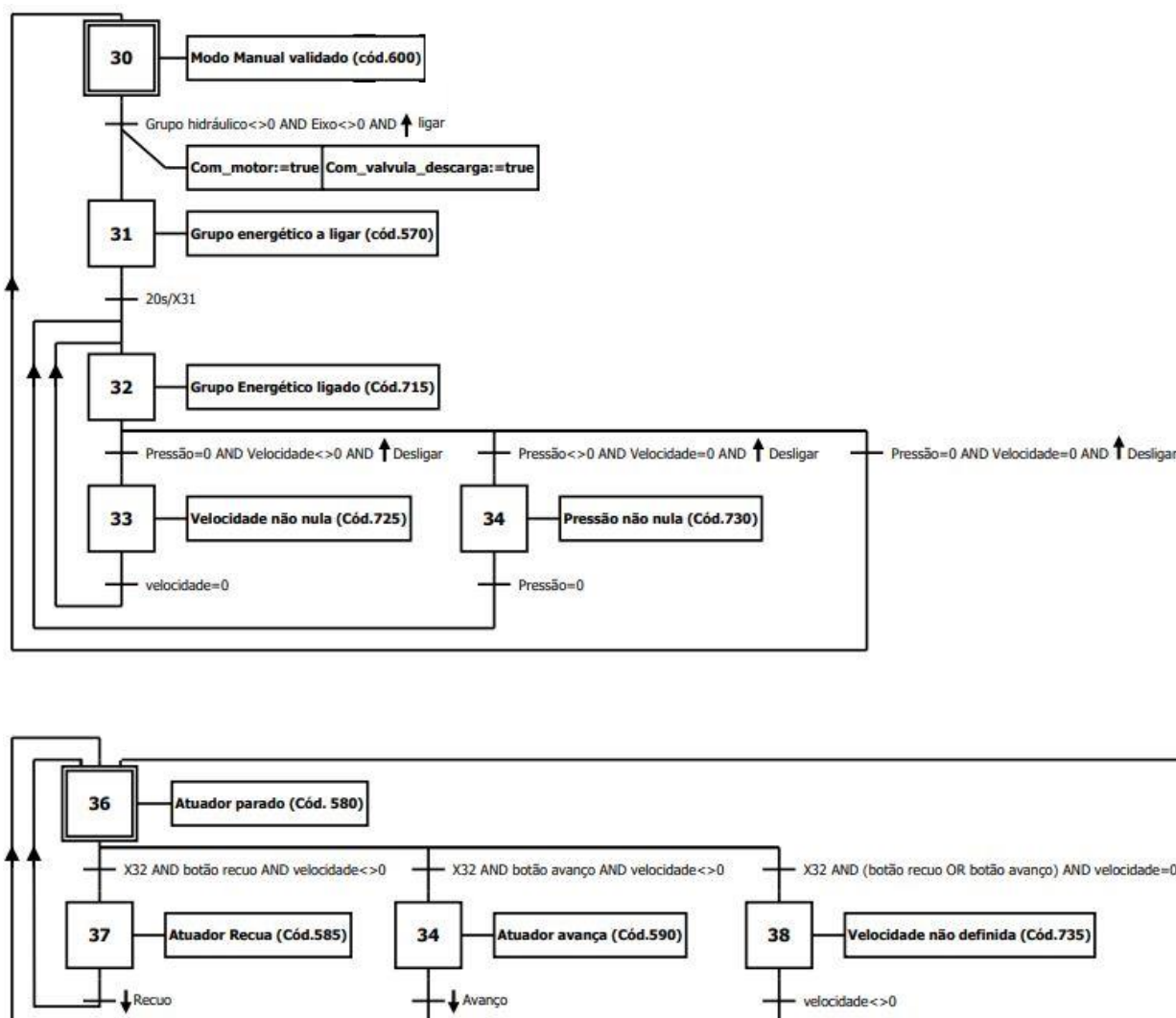


Figura D.2 - *Grafkets* de funcionamento do modo manual.

Pré-carga

O menu pré-carga, tal como referido anteriormente, pode ser acedido através do menu de calibrações ou de execução de ensaio. Este menu é praticamente igual ao modo manual, porém o comando não é sensitivo. Desta forma, quando iniciado o movimento, este pode ser interrompido e retomado posteriormente, ou abortado. Por este motivo, são apresentados os *grafkets* da figura d.4 e da figura d.5, para além do *grafcet* de funcionamento da figura d.3. Novamente, é necessário definir a velocidade de deslocação do atuador e, neste caso, se o controlo é feito em força ou posição. Para desligar a central hidráulica o valor da velocidade e da pressão tem de ser igual a zero.

No caso deste procedimento ser acedido através do menu calibrações é necessário definir a unidade energética e o eixo que contém o transdutor. Quando a pré-carga é realizada antes de um ensaio, os eixos são os mesmos eixos que foram introduzidos durante a criação do ensaio, e a central hidráulica já se encontra definida.

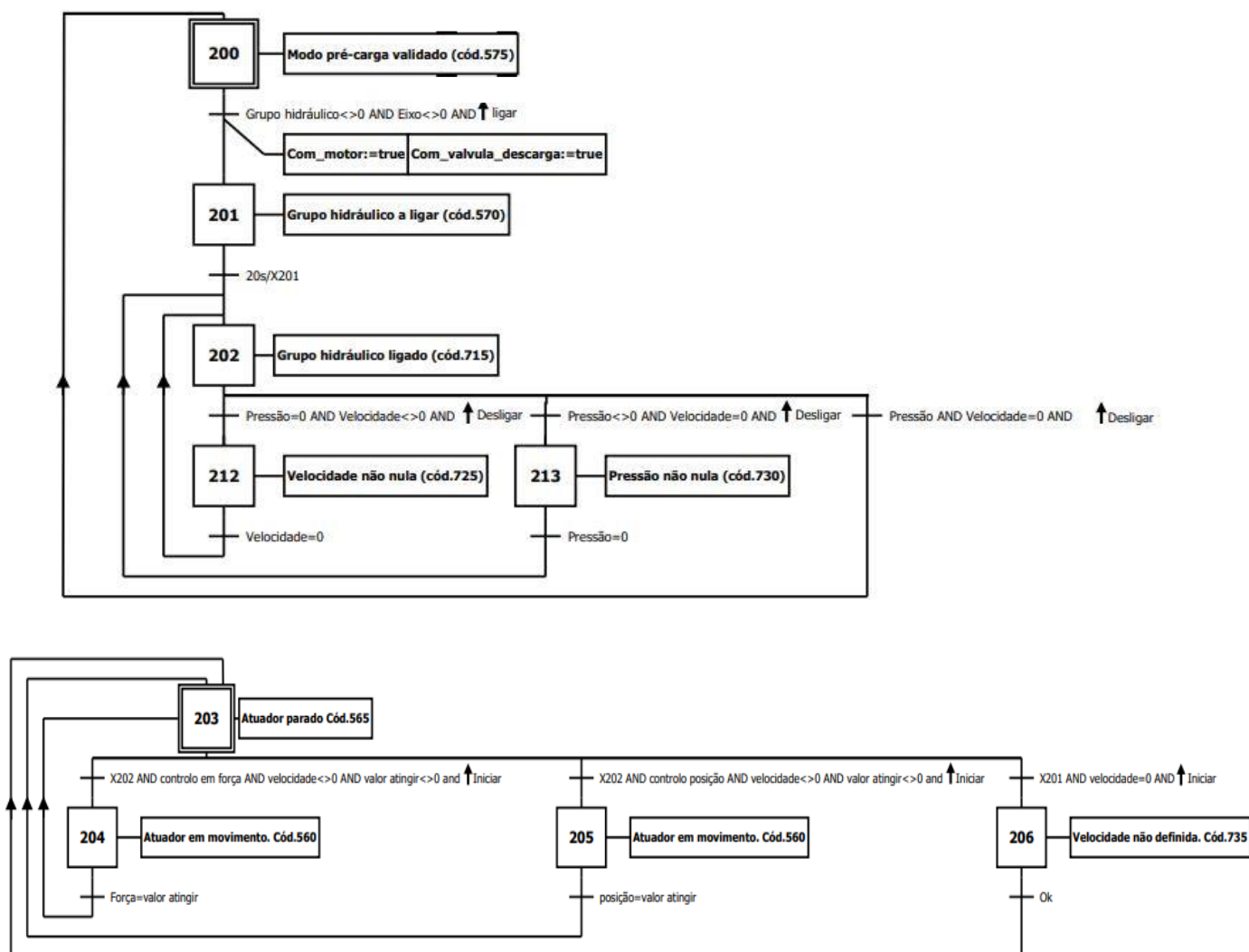


Figura D.3 - *Graficets* de funcionamento do menu de pré-carga.

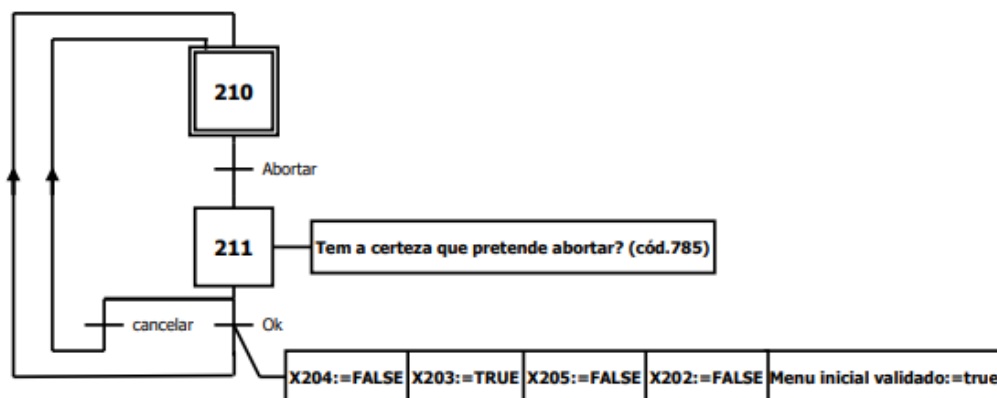


Figura D.4 - *Grafcet* de funcionamento do comando “abortar” para o procedimento de pré-carga.

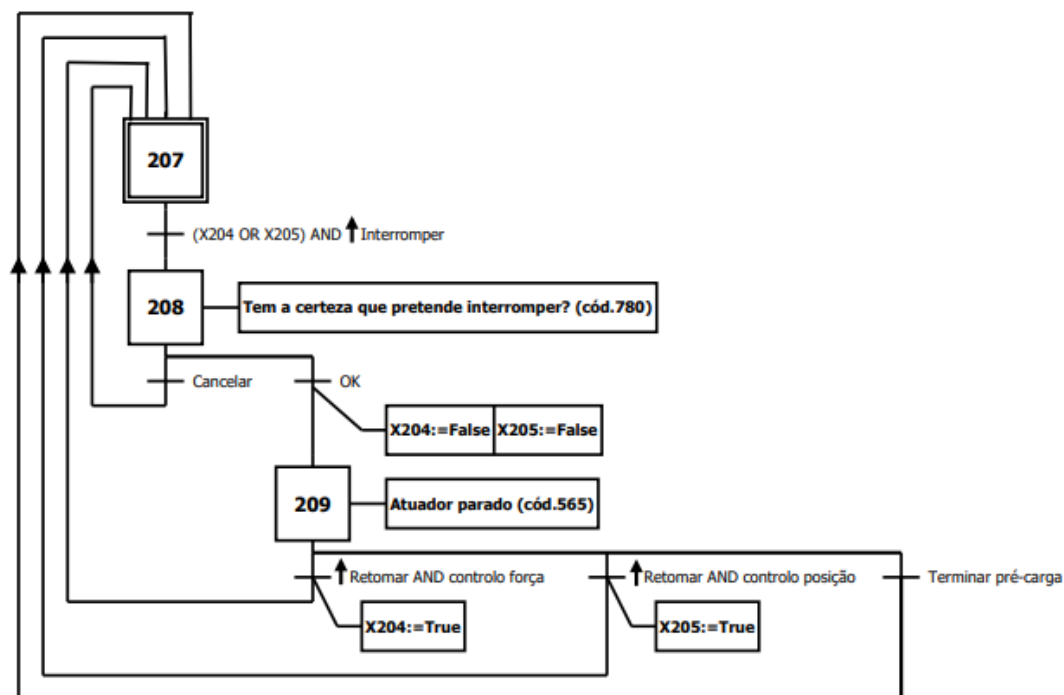


Figura D.5 - *Grafcet* de funcionamento do comando “interromper” para o procedimento de pré-carga.

Modo de ensaio

A execução de um ensaio exige que este já tenha sido definido anteriormente e guardado na base de dados. Desta forma, o ensaio pretendido deve ser carregado no procedimento aqui tratado, para que o sistema avalie se tem as condições necessárias para o aplicar.

Tal como em todos os procedimentos até agora analisados, o primeiro passo neste menu é ligar a unidade energética. Quando esta já se encontra estabilizada, o utilizador pode aceder ao procedimento de pré-carga, caso seja necessário, ou dar início ao ensaio. Durante o ensaio, o utilizador tanto pode interromper o mesmo como abortar. No caso da interrupção é possível, posteriormente, retomar o ensaio exatamente onde foi deixado ou terminar o mesmo.

Uma das condições de paragem que pode ser definida é a condição de rutura que, quando verificada procede da mesma forma que o comando abortar.

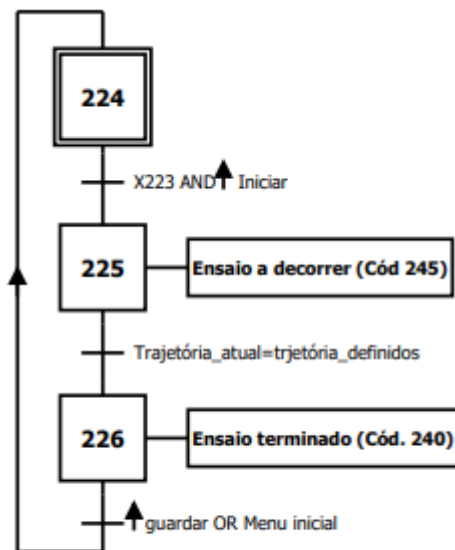
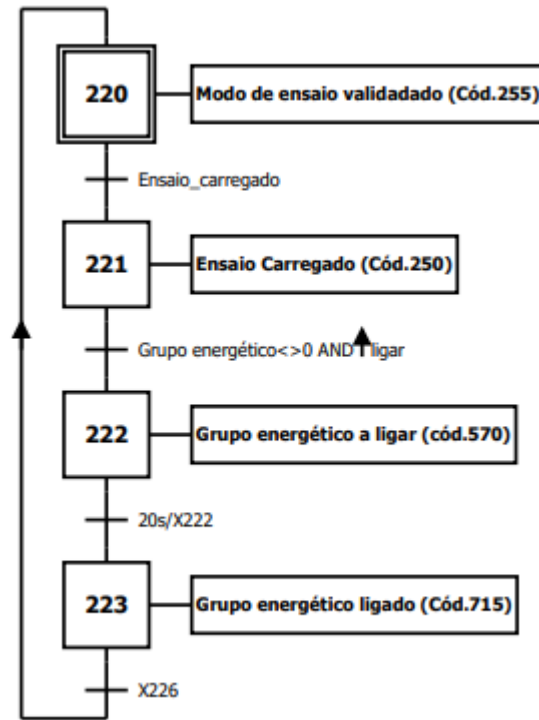


Figura D.6 - *Grafsets* de funcionamento do procedimento para executar um ensaio.

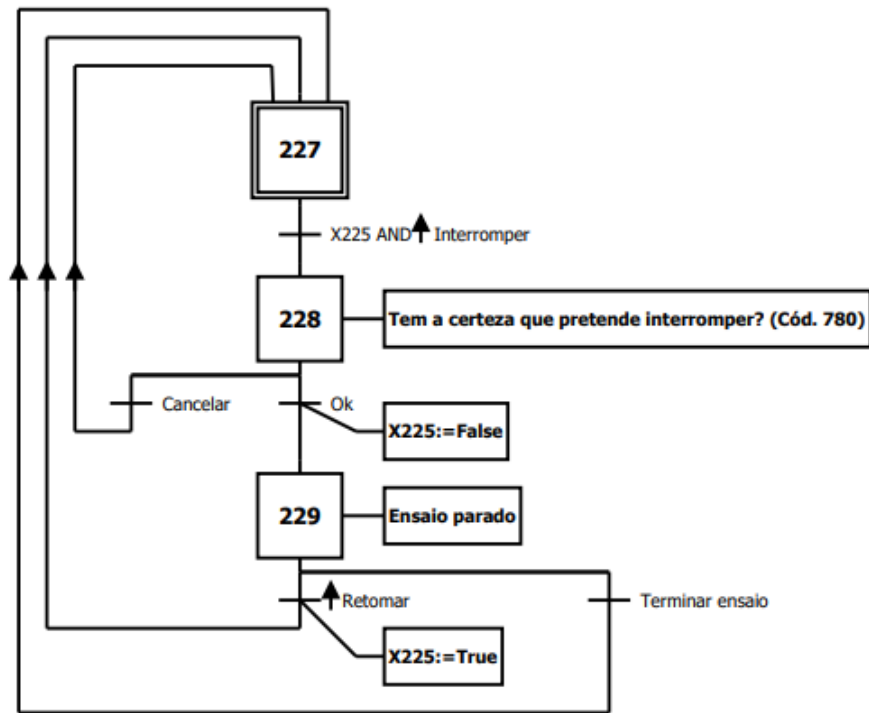


Figura D.7 - *Grafcet* de funcionamento do comando “interromper” para o procedimento de ensaio.

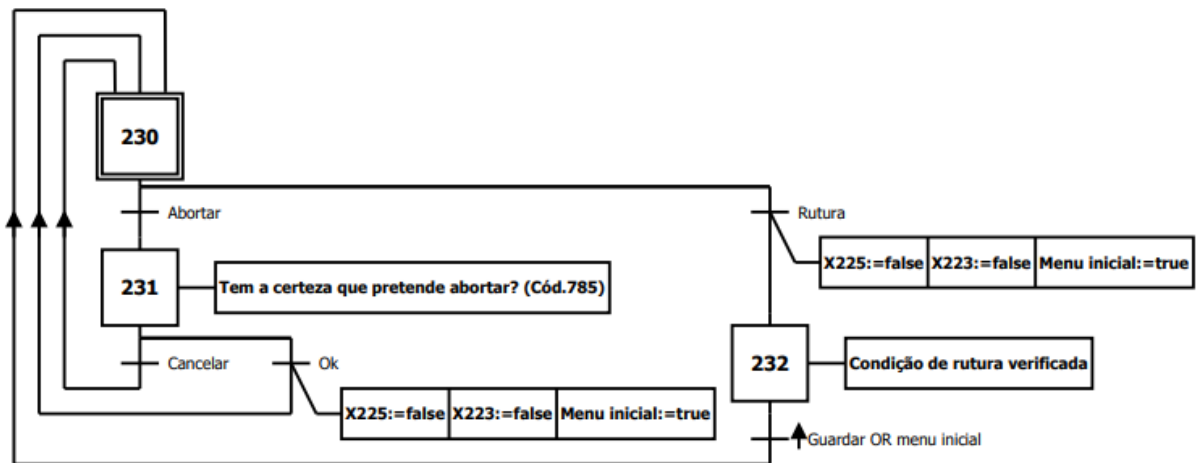


Figura D.8 - *Grafcet* de funcionamento do comando “abortar” para o procedimento de ensaio.