Controlo e monitorização de um sistema pneumático

Vítor Rafael Betencourt Carvalho

Dissertação de Mestrado

Orientadores: Professores Paulo Abreu e Fátima Chousal

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

setembro de 2021

Resumo

A utilização de sistemas pneumáticos tem, cada vez mais, grande preponderância no ramo da automação industrial, onde o baixo custo de matéria-prima, a segurança e a facilidade de controlo são algumas das principais vantagens que lhes são reconhecidas. Para além desta grande aplicabilidade, a tecnologia pneumática tem vindo a acompanhar e a adotar as inovações decorrentes da quarta revolução industrial que envolvem uma digitalização dos processos e equipamentos.

Esta Dissertação apresenta e implementa num sistema de atuação pneumática, uma solução de controlo e monitorização baseada em microcontrolador, que permite efetuar o registo e armazenamento da informação desse mesmo sistema em base de dados, em linha com os requisitos da digitalização de processos.

Inicialmente, são apresentadas várias soluções que têm sido desenvolvidas por alguns fabricantes de equipamentos pneumáticos que permitem o controlo e monitorização de sistemas pneumáticos, assegurando a digitalização desta tecnologia. Assim, é possível conhecer o estado de um sistema pneumático e efetuar manutenção preventiva nos seus componentes.

Tendo em consideração os componentes disponíveis na bancada pneumática de teste, são definidas duas configurações de funcionamento do sistema pneumático, que diferem na solução de comando do atuador linear. A configuração “sistema pneumático nº1” utiliza uma electroválvula distribuidora de cinco orifícios e duas posições, enquanto que a configuração “sistema pneumático nº2” utiliza duas electroválvulas reguladoras de pressão de comando analógico.

Na solução de controlo é possível, através da interface desenvolvida, controlar via *web* o número de movimentos que o atuador linear realiza, as temporizações entre os movimentos e a pressão pneumática.

Na solução de monitorização, são monitorizados os seguintes parâmetros: temperatura, pressão, humidade, número de movimentos efetuados pelo atuador, velocidade angular e aceleração linear.

Por fim, são realizados diversos ensaios para diferentes condições de funcionamento cujos resultados permitem uma análise comportamental e caracterização do sistema pneumático em questão.

Control and monitoring of pneumatic system

Abstract

Pneumatic systems have been playing a preponderant role in the industrial automation's field, where low raw material cost, safety and ease of control are some of the main advantages recognized to them. In addition to its great applicability, pneumatic technology has been adopting new functionalities following the fourth industrial revolution which demands a digitalization of processes and equipment.

This Dissertation presents a microcontroller-based solution, to control and monitor a pneumatic system, and also to register and store the system's data on a web server database.

Initially, an approach is made to the solutions already developed by some pneumatic equipment's manufacturers and available on the market. These solutions allow to control and monitor pneumatic systems, which permits the user to know the system's status and perform preventive maintenance on its components.

Considering the available components on the testing stand, two configurations are defined, according to which the system can operate. Each configuration has a different solution to control the pneumatic actuator. The configuration "pneumatic system no.1" uses one 5/2 solenoid spool valve and the configuration "pneumatic system no.2" uses two pressure regulator electrical valves with analog control.

Using the developed interface, it is possible to control via web different parameters according to the chosen and implemented configuration: the number of movements made by the linear actuator, as well as the time between them and the pneumatic pressure.

The monitoring system allows to monitor many parameters such as: temperature, pressure, humidity, the number of movements made by the linear actuator, angular speed, and linear acceleration.

Finally, several tests with different operating conditions are made, in order to analyze and characterize the pneumatic system's behavior.

.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Paulo Abreu e Fátima Chousal, por todo o tempo dedicado a este projeto, tanto nas reuniões semanais, como no esclarecimento de dúvidas, mas também por todo o conhecimento partilhado.

Agradeço, de forma especial, aos meus pais, por sempre me apoiarem, por todos os esforços feitos durante todo o meu percurso académico e, principalmente, por todos os valores que sempre me transmitiram. Sem eles nada teria sido possível.

Agradeço à minha namorada, Diva, por todo o companheirismo ao longo de todos estes anos, por acreditar mais em mim do que eu próprio e por ser o meu maior apoio. À sua família, deixo aqui, também, o meu agradecimento.

De maneira geral, agradeço a toda a minha família, onde incluo o meu padrinho Luís Miguel, que esteve comigo no primeiro dia em que pisei na Faculdade de Engenharia e sempre me apoiou.

Por fim, agradeço, de forma geral, a todos os meus amigos e colegas da FEUP que, de alguma forma, contribuiram para o meu percurso académico e para a minha integração na faculdade, e, em particular, ao meu amigo Vasco, por todos os bons momentos partilhados.

Índice de Conteúdos

1 Introdução 1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação 3
1.2 Objetivos do projeto 3
1.3 Metodologia de projeto 3
1.4 Estrutura da Dissertação 4
2 Soluções de monitorização em sistemas pneumáticos 5
2.1 Aventics 5
2.2 Bimba 7
2.3 FESTO 8
2.4 SMC Corporation 10
2.5 Síntese 12
3 Bancada pneumática de teste 15
3.1 Bancada pneumática 15
3.2 Componentes pneumáticos 18
3.3 Componentes de instrumentação 20
3.4 Síntese 24
4 Arquitetura do sistema de controlo e monitorização 25
4.1 Microcontrolador, módulos adicionais e comunicação 25
4.2 Solução de controlo e monitorização desenvolvida 32
4.3 Síntese 34
5 Desenvolvimento da interface de controlo e monitorização 35
5.1 Registo da informação em base de dados 36
5.2 Interface de controlo e monitorização 37
5.3 Síntese 40
6 Ensaios realizados e resultados 41
6.1 Influência da pressão no tempo da sessão 42
6.2 Evolução da pressão nas câmaras do atuador pneumático 43
6.3 Evolução da temperatura e humidade relativa 49
6.4 Síntese 53
7 Conclusões e trabalhos futuros 55
7.1 Conclusões 55
7.2 Trabalhos futuros 56
Referências 57
ANEXO A: Esquema das ligações dos sensores e das válvulas ao Arduino Mega 2560 61
ANEXO B: Resultados dos ensaios de pressão 63
ANEXO C: Resultados dos ensaios de temperatura e humidade relativa do ar 69

Siglas e abreviaturas

A/D	Analógico/Digital
AES	*Advanced Electronics System*
ARP	*Address Resolution Potocol*
CSS	*Cascading Style Sheets*
D/A	Digital/Analógico
DC	*Direct Current*
DP	*Decentralized Peripherals*
FS	*Full Scale*
FR	Filtro e Regulador de pressão
GND	*Electrical ground*
HMI	*Human-Machine Interface*
HTML	*HyperText Markup Language*
I^2C	*Inter-Integrated Circuit*
ICMP	*Internet Control Message Protocol*
IDE	*Intgrated Development Environmet*
IGMP	*Internet Group Management Protocol*
IO	*Input and Output*
IIoT	*Industrial Internet of Things*
IP	*Internet Protocol*
IPv4	*Internet Protocol version 4*
LCD	*Liquid Crystal Display*
LIM	Laboratório de Instrumentação para Medição
MAC	*Media Access Control*
MISO	*Master Input Slave Output*
MOSI	*Master Output Slave Input*
NC	*Normally Closed*
NO	*Normally Open*
PC	*Personal Computer*
PHP	*Hypertext Preprocessor*
PLC	*Programmable Logic Controller*
PPPoE	*Point-to-Point Protocol over Ethernet*
PROFIBUS	*Process Field Bus*
PWM	*Pulse-Width Modulation*
RTU	*Remote Terminal Unit*
SCK	*Serial Clock*

SCL	*Serial Clock*
SDA	*Serial Data*
SPI	*Serial Peripheral Interface*
SPM	*Smart Pneumatic Monitor*
SS	*Slave Select*
TCP	*Transmission Control Protocol*
UDP	*User Datagram Protocol*
USB	*Universal Serial Bus*
XAMPP	*Cross-Platform, Apache, MYSQL, PHP and Perl*

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema representativo das ligações do módulo *Smart Pneumatic Monitor* [6] 6

Figura 2 - Exemplo de aplicação para monitorização com o *Smart Pneumatic Monitor* [8] 6

Figura 3 - Configuração Intellisense® para recolha e armazenamento de dados e monitorização remota, adaptado de [9] 7

Figura 4 - Configuração Intellisense® para recolha e armazenamento de dados, monitorização remota e comunicação modbus RTU, adaptado de [9] 8

Figura 5 - Exemplo dos componentes típicos de um sistema pneumático onde pode ser utilizado o *software System Diagnostics* da FESTO para monitorização de componentes [10] 9

Figura 6 - Exemplo de configuração do FESTO *Motion Terminal* VTEM [11] 9

Figura 7 - *Energy efficiency module* MSE6-E2M da FESTO, adaptado de [14] 10

Figura 8 - Exemplo da montagem do *Energy efficiency module* MSE6-E2M num sistema pneumático, adaptado de [16] 10

Figura 9 - Módulo Master IO-Link da série EX600-X60 [20] 11

Figura 10 - Exemplo de sistema para monitorização com a utilização de equipamentos da SMC Corporation [21] 11

Figura 11 - Bancada pneumática de teste 16

Figura 12 - Configuração “sistema pneumático nº1” 16

Figura 13 - Configuração “sistema pneumático nº2” 17

Figura 14 - Atuador FESTO (referência: DSNU 193991) 18

Figura 15 - Electroválvula direcional Joucomatic modelo 55192009 18

Figura 16 - Válvula reguladora de pressão SMC ITV 2050-21N2BL3-Q 19

Figura 17 - Circuito de funcionamento das electroválvulas reguladoras de pressão [24] 20

Figura 18 - Sensor *Reed Switch* SMC D-A73 [25] 20

Figura 19 - Sensor de pressão com display LCD SMC ISE40A 21

Figura 20 - Representação gráfica dos resultados obtidos no conjunto de medições efetuadas 22

Figura 21 - Sensor de pressão, humidade e temperatura BME280 da Bosch [27] 23

Figura 22 - Sensor de pressão e temperatura BMP280 da Bosch [28] 23

Figura 23 - Sensor BMP280 encapsulado no corpo de um cilindro pneumático 23

Figura 24 - Módulo MPU9250 24

Figura 25 - Arquitetura da solução de controlo e monitorização 25

Figura 26 - Ligações para comunicação SPI entre o Arduino Mega 2560 e o *Ethernet Shield 2* 27

Figura 27 - Solução de comando utilizada para o solenoide da electroválvula (VD1) 27

Figura 28 - Esquema da ligação dos sensores de proximidade e pressão ao Arduino Mega 2560 29

Figura 29 - Esquema das ligações utilizadas para a comunicação seguindo o protocolo I^2C entre sensores e Arduino Mega 2560 30

Figura 30 - Resultado das medições dos valores de aceleração segundo as três direções 30

Figura 31 - Resultado das medições dos valores da velocidade angular segundo as três direções 30

Figura 32 - Esquema das ligações das electroválvulas às portas PWM do Arduino Mega 2560 31

Figura 33 - Relação entre os valores de referência para as saídas PWM e as pressões nas saídas de EV1 e EV2 32

Figura 34 - *Script* da rotina de interrupção 33

Figura 35 - Esquema de implementação da solução de controlo 34
Figura 36 - Arquitetura da rede local 35
Figura 37 - phpMyAdmin como interface de visualização da informação 37
Figura 38 - *Homepage* da interface de controlo e monitorização 38
Figura 39 - Página principal da interface de controlo 38
Figura 40 - Interface de controlo da configuração “sistema pneumático nº1” 39
Figura 41 - Interface de controlo da configuração “sistema pneumático nº2” 39
Figura 42 - Página principal da interface de monitorização 40
Figura 43 - Exemplo de uma página onde pode ser visualizada e exportada a informação 40
Figura 44 - Exemplos de sessões com e sem temporizações 41
Figura 45 - Cinco segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração “sistema pneumático nº1”, para pressão de trabalho de 5 bar 44
Figura 46 - Dez segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo, utilizando a configuração “sistema pneumático nº1”, para pressão de trabalho de 5 bar 45
Figura 47 - Cinco segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração “sistema pneumático nº2”, para pressão de trabalho de 5 bar 46
Figura 48 - Dez segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo, utilizando a configuração “sistema pneumático nº2”, para pressão de trabalho de 5 bar 47
Figura 49 - Comparação entre os resultados obtido no mesmo teste com diferentes frequências de aquisição e registo, 5 Hz e 35 Hz 48
Figura 50 - Perfil de temperatura do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº1” 50
Figura 51 - Perfil de temperatura do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº2” 50
Figura 52 - Perfil de temperatura do ar na câmara 2 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº1” 51
Figura 53 - Perfil de temperatura do ar na câmara 2 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº2” 51
Figura 54 - Perfil de humidade relativa do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº1” 52
Figura 55 - Perfil de humidade relativa do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº2” 52

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resultados obtidos nas medições da tensão de saída dos sensores de pressão para valores de pressão fixos, ajustados manualmente 21

Tabela 2 - Comparação entre os valores de tensão obtidos e os valores teóricos 22

Tabela 3 - Relação entre a pressão e a saída do conversor A/D do microcontrolador, para o mesmo valor ajustado manualmente na válvula reguladora de pressão manual 28

Tabela 4 - Valores de *"offset"* nas componentes segundos as três direções dos vetores aceleração e velocidade angular 31

Tabela 5 - Resultados obtidos nos ensaios de verificação da influência da pressão de trabalho no tempo de sessão 42

1 Introdução

A pneumática é uma tecnologia que utiliza o ar comprimido ou gases neutros como meio de atuação, transmissão e armazenamento de energia. A esta tecnologia são-lhe reconhecidas inúmeras vantagens em relação a outras tecnologias existentes no meio industrial, de onde se destacam:

- Baixo custo de matéria-prima, dada a abundância de ar existente;
- Segurança na sua utilização, por dois motivos: ausência de risco de incêndio e/ou explosão, e pressões de trabalho não muito elevadas;
- Limpeza, por se tratar de uma tecnologia não poluente;
- Facilidade de controlo, pelo que não é exigido um elevado grau de especialização na sua utilização.

A pneumática possui, há já largos anos, um papel essencial na indústria, principalmente no ramo da automação. É possível verificar a sua presença em diversas aplicações, tais como: processamento de alimentos, construção de máquinas, máquinas agrícolas, sistemas de transporte, sistemas de travagem e linhas de processamento de embalagens.

Segundo Dutt [1], a constituição de um sistema pneumático envolve duas secções: o sistema de produção de ar comprimido e o sistema de distribuição e consumo.

O sistema de produção de ar comprimido é, tipicamente, constituido pelos seguintes componentes:

- Compressor - responsável por comprimir o ar captado à pressão atmosférica e disponibilizá-lo a uma pressão superior, pela conversão de energia mecânica em energia pneumática;
- Reservatório - onde é armazenado o ar comprimido. O seu volume é definido pela capacidade do compressor e necessidade de consumo;
- Dispositivo de drenagem - responsável por expelir água do reservatório.

O sistema de distribuição e consumo do ar comprimido inclui, entre outros, os seguintes componentes:

- Rede de distribuição de ar - composta por várias tomadas de engate rápido alimentadas pelo ar comprimido, que é retirado pela parte superior da tubagem principal para evitar a presença de condensado;
- Sistema de drenagem automático - responsável por expelir o condensado nas linhas da rede de distribuição, de forma automática;
- Unidade FR - tem a função de filtrar e regular a pressão do ar a ser fornecido aos atuadores;
- Elementos de comando de potência - normalmente são válvulas direcionais;

- Atuadores - transformam a energia pneumática em trabalho mecânico. Podem ser lineares ou rotativos;
- Elementos de controlo - válvulas fluxométricas e manométricas. Controlam o fluxo e a pressão do ar comprimido;
- Elementos de monitorização - componentes de instrumentação, por exemplo: sensores de presssão, caudal e temperatura.

Ao longo da última década, no meio industrial, têm sido feitos progressos bastante significativos nos ramos da *Industrial Internet of Things* (IIoT) e da Indústria 4.0. Nesse sentido, chegou-se a questionar, no meio industrial, se a introdução de novas tecnologias relacionadas com a quarta revolução industrial seria possível na pneumática. Contudo, rapidamente se percebeu que os componentes pneumáticos teriam uma excelente capacidade de adaptação às inovações tecnológicas, como referido em Reljic et al. [2]. A integração de componentes eletrónicos na pneumática confere-lhe maior inteligência e flexibilidade, possibilitando assim, um aumento da produtividade e da eficiência dos processos. Assim, surgiu o conceito de digitalização pneumática [3].

Neste novo conceito, a monitorização dos componentes pneumáticos revela-se fundamental, pois através da colocação, em diferentes pontos do sistema, de sensores de pressão, de caudal, entre outros, é possível ter um conhecimento mais detalhado do estado do sistema em cada momento. De forma geral, alguns dos parâmetros com maior interesse no âmbito da monitorização em sistemas pneumáticos são:

- A pressão - utilizando sensores de pressão torna-se possível saber, além do valor da pressão, se existe alguma fuga na rede;
- A temperatura e humidade do fluído de trabalho - a informação acerca destes parâmetros permite prevenir danos por corrosão no atuador, devidos ao excesso de humidade e/ou temperatura;
- O número de atuações de uma válvula - permite estimar a vida útil de cada válvula;
- O número de ciclos efetuados pelo(s) atuador(es) - à semelhança do anterior, permite estimar a vida útil do(s) atuador(es);
- O tempo de ciclo.

Embora o fim da quarta revolução industrial seja, ainda, longínquo, a introdução da digitalização na indústria, em geral, e na pneumática, em particular, é cada vez mais notória.

O controlo e a monitorização em sistemas pneumáticos, dispondo de sensores e controlador ligados a uma mesma rede e a um servidor, permite registar toda a informação relativa ao sistema. Informação essa que poderá ser acedida através de qualquer PC, desde que esteja ligado a essa rede, e processada para assim gerar gráficos e tabelas, para uma mais rápida e simples análise do estado do sistema e dos seus componentes, bem como para poder ser planeada manutenção preventiva de componentes.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Toda a vertente prática deste projeto, que se insere na área da instrumentação e monitorização, foi desenvolvida numa bancada pneumática para ensaios disponibilizada no Laboratório de Instrumentação para Medição, dando seguimento a trabalhos anteriores no âmbito de sistemas de monitorização, em Capela [4] e Abreu et al. [5].

No âmbito da digitalização pneumática, existem já no mercado algumas soluções que permitem efetuar monitorização em sistemas pneumáticos. Contudo, neste projeto, a intenção é desenvolver uma solução que efetue o controlo e a monitorização com registo em base de dados utilizando apenas um controlador. Neste projeto, dada a simplicidade do sistema pneumático, optou-se pela utilização da plataforma Arduino, que disponibiliza uma grande variedade de microcontroladores e soluções de *hardware* para implementação de interfaces digitais, analógicas e de comunicação. Trata-se de uma solução de custo relativamente baixo e possui a flexibilidade necessária para satisfazer todas as funções requeridas neste projeto.

1.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo a atingir com este projeto é o desenvolvimento de uma solução de controlo e monitorização que permita a aquisição e registo da informação relativa a um dado sistema pneumático (pressão, estado de fins de curso, temperatura, aceleração, entre outros) em base de dados, com a possibilidade de acesso remoto. Para que tal seja possível, é necessária uma requalificação do sistema pneumático inicialmente disponibilizado. Para além destas funcionalidades de aquisição e registo é também esperado que seja feita uma reconfiguração do sistema existente, de forma a permitir implementar diferentes funções de controlo do atuador pneumático.

Tendo sido desenvolvida uma solução que satisfaça os requisitos acima mencionados devem ser realizados diversos ensaios que possibilitem efetuar uma análise comportamental do sistema pneumático para as diferentes funções de controlo e condições de trabalho.

1.3 Metodologia de projeto

O projeto desenvolvido nesta Dissertação foi dividido em cinco fases, todas elas descritas abaixo.

Numa fase inicial, fez-se uma pesquisa e análise de soluções já existentes no mercado, das quais foram escolhidas para serem apresentadas neste documento aquelas que, de alguma forma, pudessem ter um princípio de funcionamento idêntico ao da solução desejada. Nesta fase foi, também, analisado o sistema já existente, no que a *software* e *hardware* diz respeito. Para tal foi fundamental a revisão bibliográfica de documentação referente à plataforma Arduino, da linguagem de programação utilizada e também das suas potencialidades e limitações.

Numa segunda fase, uma fase mais *hands-on*, foi requalificado o sistema já existente, garantindo a operacionalidade de todos os componentes disponíveis. Foram, então, desenvolvidos pequenos programas que podem ser utilizados para verificar, individualmente, o correto funcionamento de cada componente.

Uma vez garantida a funcionalidade do sistema, iniciou-se a terceira fase, correspondente ao desenvolvimento da solução de controlo. Esta fase teve dois períodos distintos: um primeiro no qual foi desenvolvida uma solução de controlo utilizando uma electroválvula direcional como elemento de comando para atuador pneumático (cilindro de duplo efeito simétrico) e um segundo em que o controlo do mesmo atuador é efetuado utilizando duas electroválvulas reguladoras de pressão, cada uma delas ligada a uma câmara do cilindro de duplo efeito simétrico.

Finalizada a terceira fase, onde já era satisfeito um dos requisitos deste projeto, deu-se início à quarta fase, onde foram desenvolvidas a solução de monitorização e a interface para controlo e monitorização do sistema pneumático. Esta foi a fase mais longa do projeto, pois os problemas encontrados foram largamente superiores ao espectável, principalmente, na implementação de uma solução de aquisição e registo de dados em servidor *web*.

Por fim, com a solução de controlo e monitorização desenvolvida a satisfazer todos os requisitos, foram realizados diversos ensaios para diferentes condições de trabalho e analisados os resultados obtidos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em sete capítulos, este inclusive, alguns deles subdivididos em subcapítulos. No final podem ser encontradas as referências e os anexos. Segue-se uma descrição muito sucinta de cada um dos capítulos.

No capítulo 2, são apresentadas algumas soluções já desenvolvidas por fabricantes como a FESTO, a Bimba, a SMC Corporation ou a Aventics, no âmbito da digitalização de sistemas pneumáticos.

No capítulo 3, são descritos detalhadamente todos os dispositivos, pneumáticos e de instrumentação, disponíveis na bancada de teste utilizada no desenvolvimento desta Dissertação. São também apresentadas as duas configurações do sistema pneumático que podem ser implementadas, manualmente, para utilização da solução de controlo e monitorização desenvolvida.

No capítulo 4, são expostos os requisitos que devem ser cumpridos pelo microcontrolador a utilizar e, consequentemente, a escolha do mesmo. Seguidamente, é feita uma especificação das características do microcontrolador e dos módulos adicionais, de relés e de ligação à rede, que constituem a solução desenvolvida no âmbito desta Dissertação. Neste capítulo faz-se, também, uma breve descrição dos protocolos de comunicação utilizados e são apresentados alguns esquemas das ligações necessárias para que essa mesma comunicação seja estabelecida. Por fim é exposta a solução de controlo e monitorização.

No capítulo 5, além da solução utilizada para o armazenamento em base de dados da informação monitorizada é, também, descrita a interface desenvolvida que permite controlar e monitorizar o sistema pneumático.

Com o intuito de se fazer uma descrição comportamental do sistema pneumático nas duas configurações de *hardware* possíveis de implementar, no capítulo 6, são apresentados e analisados os resultados de diversos ensaios realizados.

Por fim, no capítulo 7, são mencionadas tanto as conclusões obtidas, como possíveis novas funcionalidades e/ou alterações a serem implementadas futuramente com o objetivo de melhorar o trabalho já desenvolvido.

2 Soluções de monitorização em sistemas pneumáticos

Dada a constante evolução na indústria, é fundamental o desenvolvimento de novas soluções por parte dos fabricantes de modo a aprimorar a monitorização e controlo de sistemas pneumáticos. Nesse sentido, estão já disponíveis no mercado algumas soluções que pretendem facilitar e otimizar a forma como a monitorização de dispositivos e sistemas pneumáticos é feita.

Neste capítulo são apresentados alguns desses sistemas de monitorização desenvolvidos por quatro dos principais fornecedores de componentes pneumáticos: Aventics, Bimba, FESTO e SMC Corporation.

2.1 Aventics

No ano de 2017 a Aventics desenvolveu e introduziu no mercado uma solução de monitorização denominada *Smart Pneumatic Monitor* (SPM) [6]. Trata-se de um módulo que juntamente com equipamentos da gama *Advanced Electronics System* (AES) [7], do mesmo fabricante, analisa os sinais dos sensores existentes para avaliar o estado do sistema monitorizado. Estes sinais são utilizados para gerar informação acerca do estado do mesmo permitindo assim saber antecipadamente quando será atingido o limite de uso de cada componente e consequentemente a necessidade de intervenção técnica para substituição. Os dados utilizados são, por exemplo: o número de vezes que uma electroválvula é ligada/desligada, o consumo de ar e o tempo que um atuador demora a completar um ciclo. É de salientar que tanto a recolha como a análise da informação são feitas de forma independente relativamente ao controlador.

Na Figura 1, é possível observar tanto a ligação entre o módulo SPM e um bloco de válvulas, da gama AES, onde podem ser ligados componentes do sistema pneumático, como a ligação do módulo SPM à internet. Esta última, que possibilita a partilha da informação para o armazenamento na *cloud*¸ pode ser obtida utilizando-se uma rede sem fios ou então a ligação *Ethernet*.

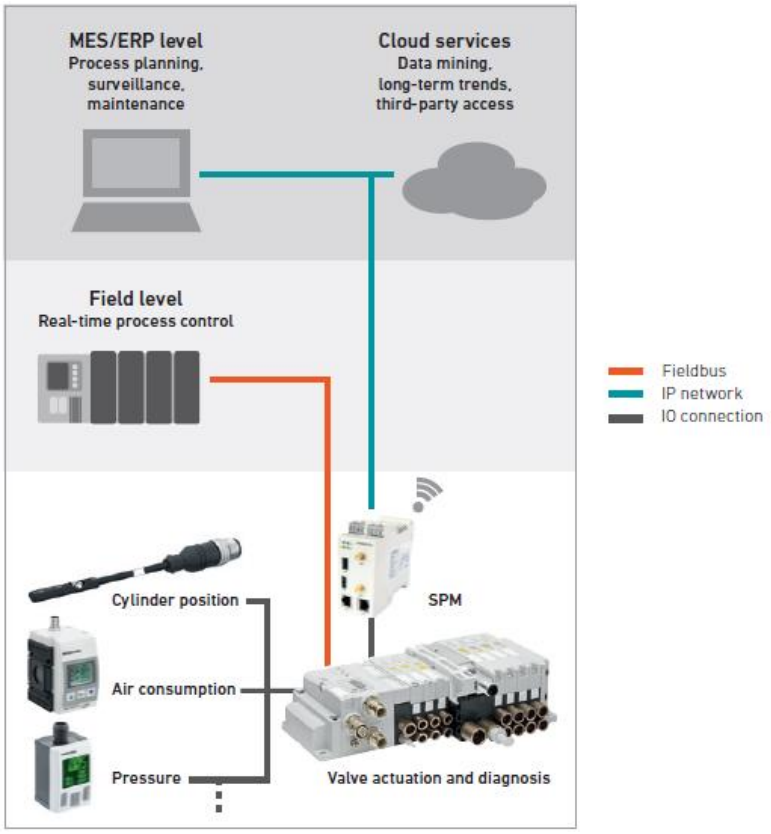


Figura 1 - Esquema representativo das ligações do módulo *Smart Pneumatic Monitor* [6]

A Figura 2 apresenta um exemplo da utilização do módulo SPM para monitorização com ligação à rede por *Ethernet* onde são analisados os sinais dos sensores de caudal e pressão do ar comprimido e de posição do atuador.

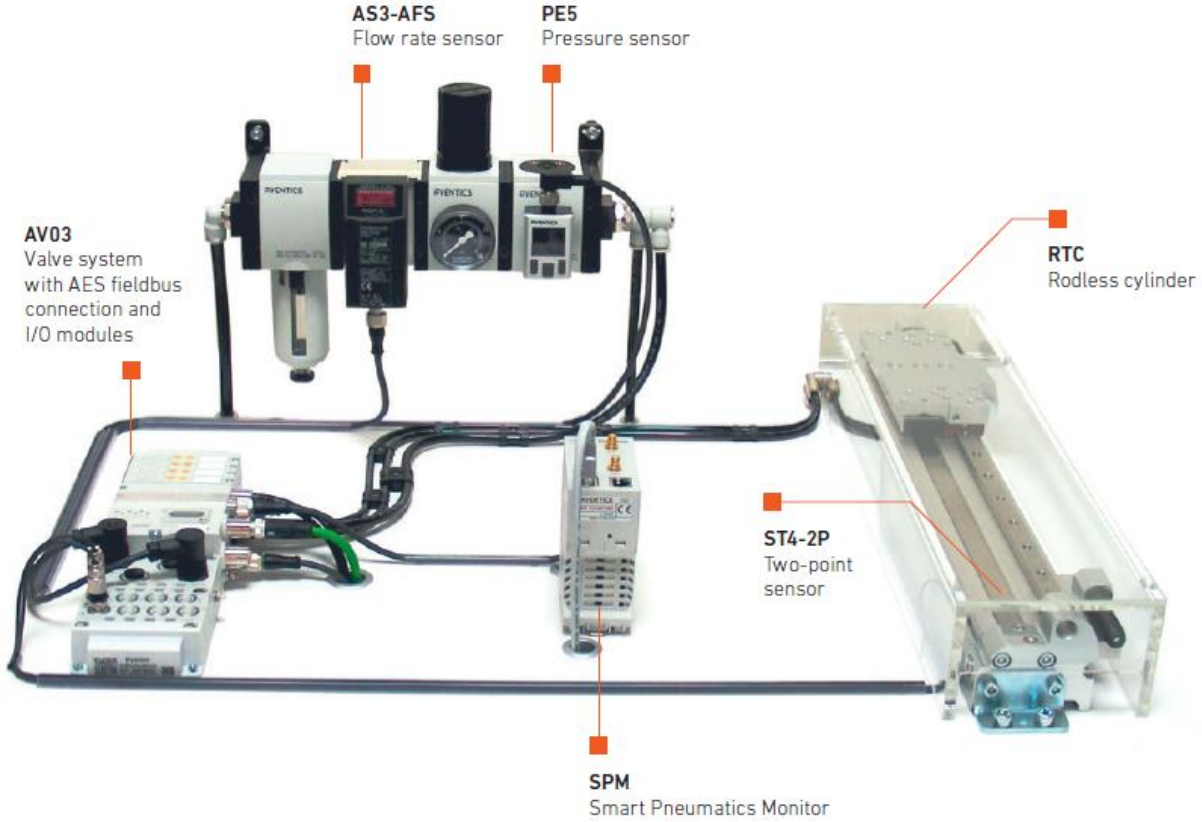


Figura 2 - Exemplo de aplicação para monitorização com o *Smart Pneumatic Monitor* [8]

2.2 Bimba

Inicialmente com o objetivo de obter e fornecer informação sobre o desempenho de componentes pneumáticos em tempo real, foi desenvolvido pela Bimba o módulo *Intellisense*® [9], que combina a utilização de atuadores, sensores (de pressão e de temperatura) e *software*. Todos os dados obtidos relativos ao sistema pneumático são posteriormente enviados para PCs ou PLCs (*Programmable Logic Controller*) e possibilitam efetuar uma manutenção pró-ativa, sendo possível estimar o número de ciclos que ainda poderão ser efetuados sem que haja qualquer dano provocado por desgaste dos componentes. São também supervisionados outros parâmetros, tais como: tempos de avanço e de recuo e fugas que implicam um aumento do consumo de ar. Todos estes parâmetros poderão ser disponibilizados em *Dashboards*.

O *hardware* pode ser adquirido individualmente ou em *kits*. São disponibilizados três *kits Intellisense*®: o *Basic Kit*, desenvolvido para clientes que desejam um fornecimento de energia e cablagem próprios e que oferece o *software* e *hardware* básico para o seu funcionamento; o *Starter Kit*, o conjunto ideal para bancadas de teste e desenvolvimento de produto, que além do *kit* apresentado anteriormente contém uma fonte de alimentação de 24 V e os cabos necessários para as ligações entre os dispositivos e o módulo; e finalmente o *Data Kit*, com todo o *hardware* e *software* necessários para aquisição, armazenamento e monitorização da informação de um dado sistema.

A Figura 3 apresenta uma configuração do *Intellisense® Data Kit* que permite a recolha e armazenamento de dados e monitorização remota. O módulo *Intellisense® Kit Sensor Interface and Sensor Pair* é ligado aos sensores que estão no circuito pneumático e envia toda a informação para o *Intellisense® Data Gateway*, que estando ligado a rede é responsável pelo armazenamento dos parâmetros monitorizados e envio dos mesmos para a *cloud* onde podem ser acedidos a partir de qualquer parte do mundo.

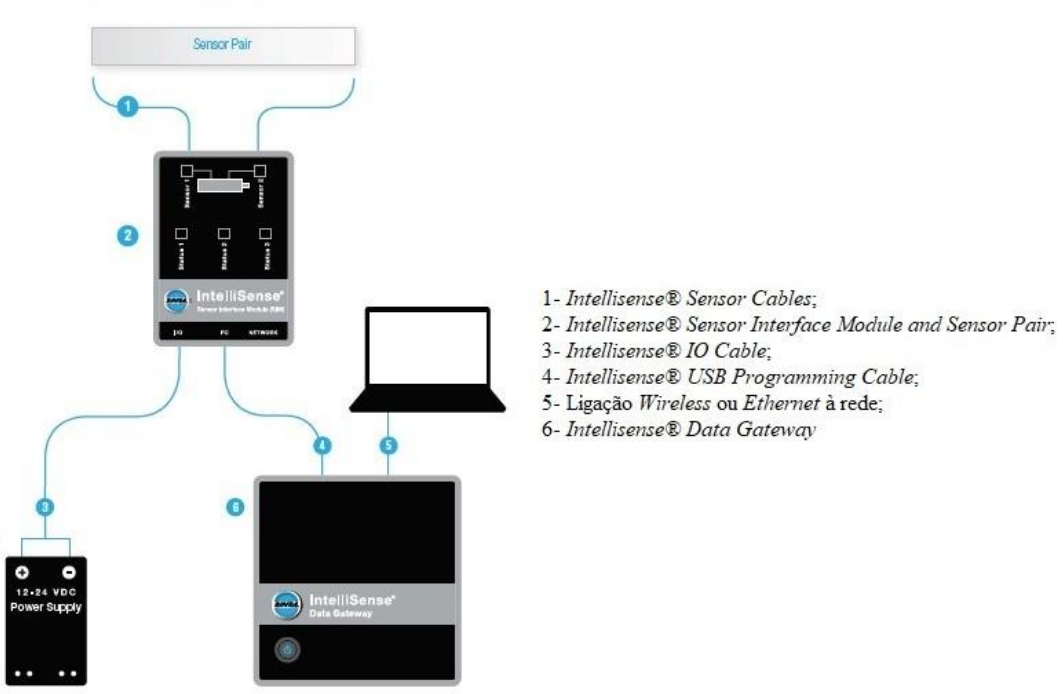


Figura 3 - Configuração Intellisense® para recolha e armazenamento de dados e monitorização remota, adaptado de [9]

A configuração do mesmo *kit* na Figura 4 possibilita a recolha e armazenamento de dados, monitorização remota e comunicação utilizando o protocolo de comunicação modbus *Remote Terminal Unit* (RTU), ou seja, trata-se uma solução em tudo semelhante à apresentada anteriormente, porém com ligação a um PLC, o que permite uma maior flexibilidade na monitorização e controlo do sistema pneumático.

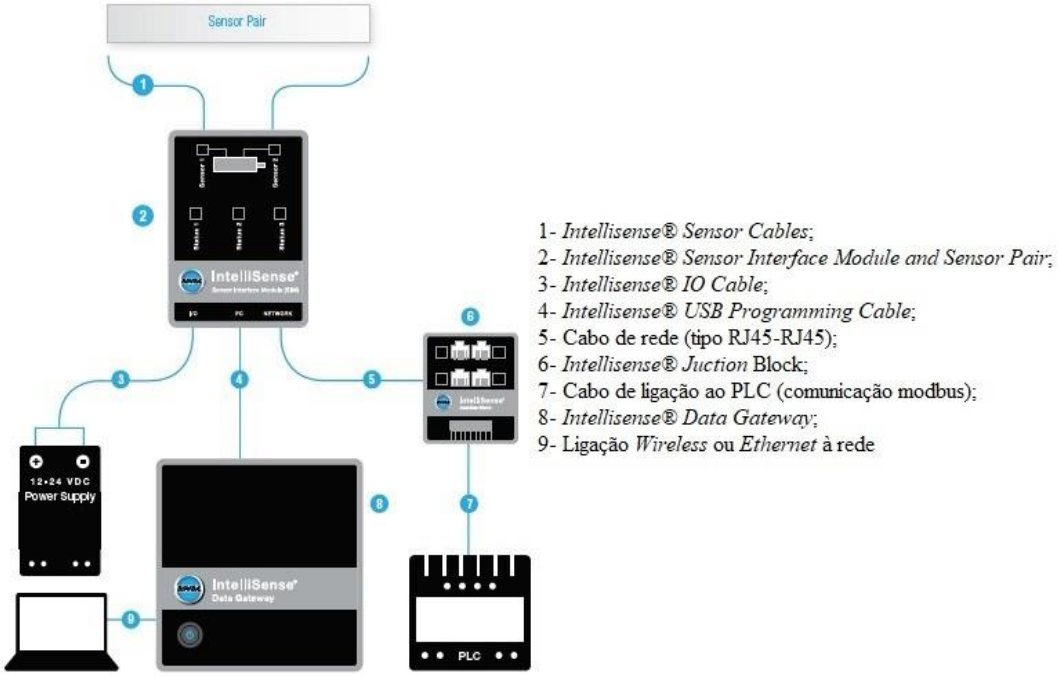


Figura 4 - Configuração Intellisense® para recolha e armazenamento de dados, monitorização remota e comunicação modbus RTU, adaptado de [9]

2.3 FESTO

A FESTO tem vindo a ser um dos fabricantes que mais investe na área da digitalização da pneumática. O *System Diagnostics* [10], o FESTO *Motion Terminal* VTME [11, 12, 13] e o *Energy efficiency module* MSE6-E2M [14, 15, 16] são três exemplos de soluções desenvolvidas por este fabricante neste ramo. A primeira está inserida no grupo das soluções onde a monitorização é integrada no controlador do sistema pneumático. Já o *Energy efficiency module* MSE6-E2M e o *System Diagnostics*, à semelhança das soluções da Bimba e da Aventics, realizam a monitorização de forma independente em relação ao controlador do sistema pneumático.

O *System Diagnostics*, é um *software* que, integrado no seu PLC modular CPX-FEC [17], permite a recolha e análise dos sinais recebidos pelo controlador relativos aos sensores e atuadores que integram o sistema pneumático. Uma construção típica onde a implementação do *System Diagnostics* é possível, poderá ser constituída por uma *Human Machine Interface* (HMI), diversos tipos de sensores e válvulas, atuadores, um PC e um controlador. A HMI e o PC são responsáveis por disponibilizar a informação recebida pelo CPX-FEC e a sua comunicação com este último é realizada por uma ligação *Ethernet*, como é ilustrado na Figura 5.

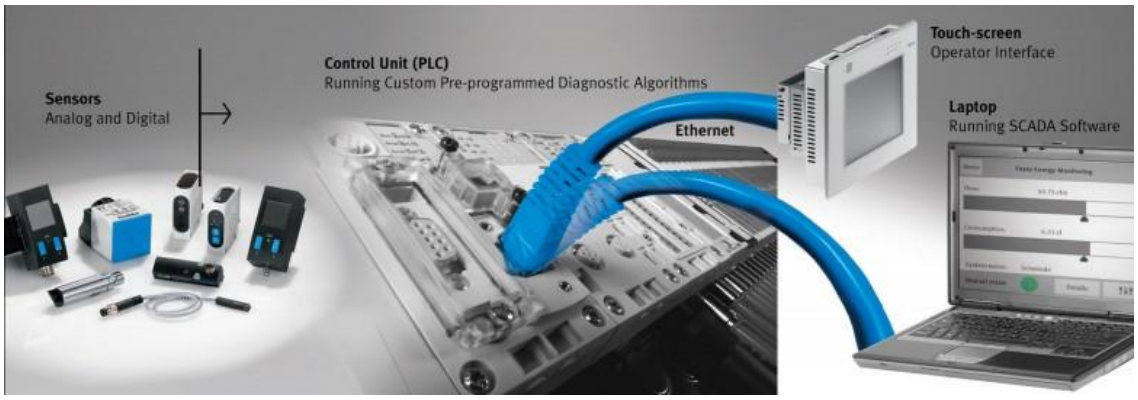


Figura 5 - Exemplo dos componentes típicos de um sistema pneumático onde pode ser utilizado o *software System Diagnostics* da FESTO para monitorização de componentes [10]

O FESTO *Motion Terminal* VTME (Figura 6) é classificado pela FESTO como sendo "o futuro da pneumática". Esta solução, que pode ter diferentes configurações, consiste num bloco composto por sensores integrados, um controlador, um módulo de entradas e saídas (digitais e analógicas), um conjunto de electroválvulas configuráveis e o módulo *Ethernet WebConfig Interface*.



Figura 6 - Exemplo de configuração do FESTO *Motion Terminal* VTEM [11]

No controlador do FESTO *Motion Terminal* VTEM estão implementados os *Motion Apps* [18], que são algoritmos de *software* que definem qual a função que deverá ser desempenhada por cada válvula em cada momento sem qualquer alteração a nível de *hardware*, num determinado sistema pneumático. Estas válvulas configuráveis podem assumir a função de mais de cinquenta componentes, entre eles: válvulas direcionais, válvulas reguladoras de pressão, válvulas reguladoras de caudal e sensores de pressão. Além da elevada flexibilidade e redução da complexidade do sistema, conseguidas pelo elevado número de componentes que se conseguem "obter" a partir de apenas um, existem outras vantagens associadas à utilização desta solução, nomeadamente o facto de ser possível a deteção de perdas de pressão, efetuar controlo de força e velocidade e a sua manutenção ser bastante reduzida. A comunicação entre o controlador do FESTO *Motion Terminal* e o *gateway* responsável pela receção da informação e partilha da mesma para a *cloud* é estabelecida através de uma ligação *Ethernet*. Posteriormente a informação pode ser disponibilizada em *dashboards* onde está também disponível o *software* de manutenção do sistema.

Na Figura 7 é representado o *Energy efficiency module* MSE6-E2M que, como o próprio nome indica, é um módulo que avalia o grau de eficiência energética de um sistema pneumático e tem capacidade para desempenhar três funções: cortar o fornecimento de ar comprimido, detetar automaticamente possíveis fugas e ainda monitorizar pressão, caudal e

consumo de ar. A função de monitorização que o módulo disponibiliza pode ser otimizada com a integração do FESTO *IO-Gateway* no sistema, o que permite o envio da informação recolhida para a *cloud*, onde é feita a análise e armazenamento da mesma.

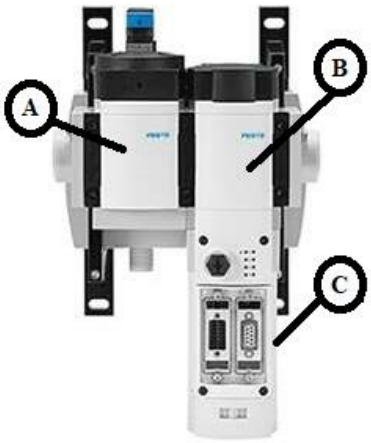


Figura 7 - *Energy efficiency module* MSE6-E2M da FESTO, adaptado de [14]

Esta solução (Figura 7) é constituída por uma válvula de corte do fornecimento de ar comprimido (A), dois sensores (B), um de pressão e um de caudal, e um nó de barramento (C) que permite a sua ligação a um controlador para que a informação recolhida possa ser analisada. Esta ligação pode ser feita utilizando os procotolos *fieldbus*: PROFIBUS DP, PROFINET IP, EtherNet/IP ou EtherCAT.

A Figura 8 ilustra a forma como o módulo de eficiência energética pode ser inserido num sistema pneumático.

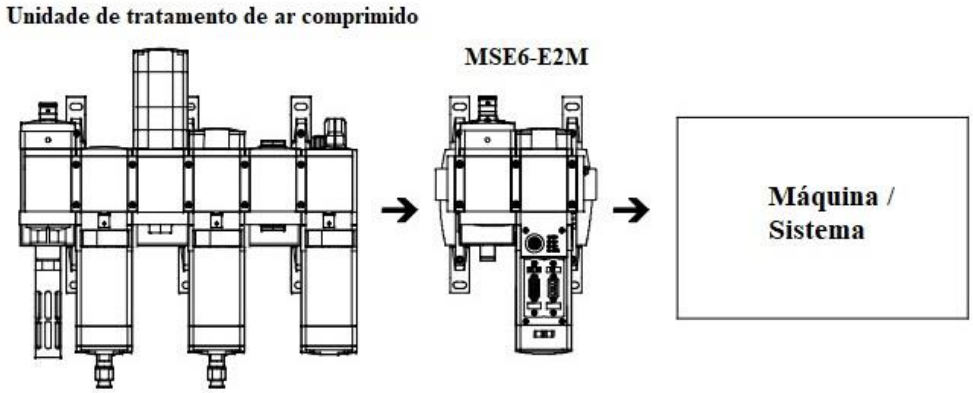


Figura 8 - Exemplo da montagem do *Energy efficiency module* MSE6-E2M num sistema pneumático, adaptado de [16]

2.4 SMC Corporation

Ainda que não tenha desenvolvido um sistema específico para monitorização, a SMC Corporation apresenta uma vasta gama de equipamentos que, sendo integrados numa rede, podem formar um sistema de digitalização para monitorização pneumática.

Um bom exemplo é a gama IO-Link [19], um conjunto de sensores e atuadores que têm a particularidade de utilizarem o protocolo de comunicação IO-Link. Segundo o fabricante, a utilização deste protocolo pelos equipamentos confere-lhes maior capacidade de disponibilizar informação e efetuar diagnósticos, possibilita a alteração remota dos parâmetros

de uma forma segura e garante simplicidade de ligação uma vez que apenas é necessário um conector que assegura a alimentação e comunicação utilizando um sistema *plug & play*.

Na Figura 9 é apresentado o bloco master onde são ligados os atuadores e sensores de pressão, caudal e posição do atuador da gama acima referida. O *Master IO-Link* da série EX600-X60, é o responsável pela partilha de todos os dados para a unidade de controlo externa (PLC) via CC-Link IE Field. Posteriormente, a análise dos parâmetros monitorizados é assegurada por um PC que recebe a informação enviada pelo PLC.



Figura 9 - Módulo Master IO-Link da série EX600-X60 [20]

Na Figura 10 é apresentado um possível exemplo de sistema para monitorização pneumática integrando os mais variados dispositivos da SMC Corporation.

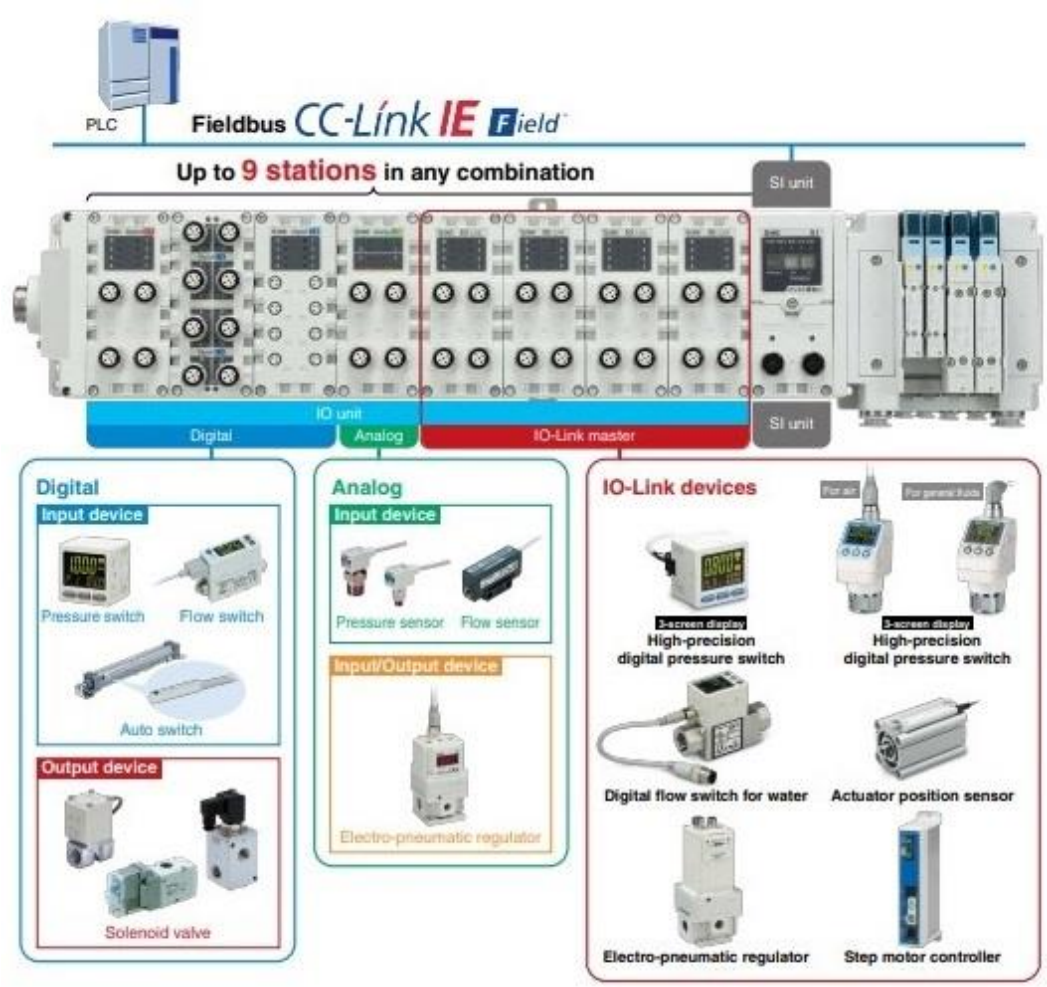


Figura 10 - Exemplo de sistema para monitorização com a utilização de equipamentos da SMC Corporation [21]

2.5 Síntese

Nesta secção são apresentadas e sucintamente descritas algumas soluções já desenvolvidas por fabricantes como a FESTO, a SMC Corporation, a Bimba ou a Aventics, no âmbito da digitalização da pneumática. Todas estas soluções possibilitam efetuar monitorização de sistemas pneumáticos, contudo, diferem umas das outras na forma em como é efetuada a monitorização em relação ao sistema de controlo. Assim, estas podem ser dividas em dois grandes grupos: aquelas em que a monitorização é integrada na solução de controlo do sistema pneumático e aquelas em que a monitorização é feita de forma independente relativamente ao sistema de controlo.

O grupo das soluções em que a monitorização é integrada no controlo do sistema pneumático poderá ainda ser dividido em dois subgrupos, tendo em conta o tipo solução:

- Soluções genéricas, que são compostas por componentes "individuais" que integrados num sistema poderão constituir uma solução com grande interesse no âmbito da monitorização de sistemas pneumáticos. Neste grupo, enquadra-se a solução da SMC Corporation apresentada, em que um conjunto de sensores e válvulas pertencentes a uma gama podem ser incorporados num sistema e possibilitar a monitorização desse mesmo sistema pneumático;
- Soluções particulares, que são soluções já desenvolvidas pelos fabricantes, com o intuito de possibilitar a monitorização de sistemas pneumáticos e que dispõem de um conjunto de funções particulares, válvulas configuráveis por *software* e comunicação por rede, por exemplo. A solução FESTO *Motion Terminal* VTEM é, daquelas que foram apresentadas, a solução que se insere neste grupo uma vez que se trata de um bloco composto por sensores integrados, um controlador, um módulo de entradas e saídas (digitais e analógicas), um conjunto de electroválvulas configuráveis por *software* e o módulo de comunicação.

No grupo das soluções em que a monitorização é feita de forma independente relativamente ao sistema de controlo, inserem-se, as restantes soluções apresentadas:

- *Smart Pneumatic Monitor* da Aventics, composto por módulo de comunicação e *software* de análise dos parâmetros monitorizados;
- *Intellisense*® da Bimba, composto por sistema de monitorização, módulo de comunicação e *software* de análise dos parâmetros monitorizados;
- *System Diagnostics* da FESTO, um *software* que permite a recolha e análise dos sinais recebidos pelo controlador relativamente ao sensores e atuadores que constituem o sistema;
- *Energy efficiency module* MSE6-E2M da FESTO, um módulo que avalia o grau de eficiência energética de um sistema pneumático e permite a monitorização de parâmetros como a pressão e o consumo de ar, por exemplo.

Pela análise das soluções apresentadas, verificou-se a importância da monitorização na manutenção preventiva dos componentes constituintes de um sistema pneumático. Assim, existem alguns parâmetros monitorizados que são transversais a todas as soluções apresentadas, tais como a pressão e o consumo de ar. A monitorização destes parâmetros permite detetar, caso exista, alguma fuga de ar. Além destes, existem parâmetros que são monitorizados apenas em algumas das soluções, mas com igual importância, tais como:

- Temperatura e humidade, para prevenção de danos por corrosão;
- Tempos de avanço e recuo do atuador, para conhecimentos do tempo que o atuador demora a completar um ciclo de trabalho;

- Número de ciclos completados, para estimar a vida útil dos componentes sujeitos a desgaste.

Tendo em conta a classificação atribuída anteriormente às soluções apresentadas, a solução desenvolvida e implementada nesta Dissertação, enquadra-se no grupo das soluções em que a monitorização é integrada no controlo do sistema pneumático. Contudo, por se tratar de uma aplicação didática, mas representativa de sistemas pneumáticos industriais, opta-se pela utilização de um microcontrolador, que é o mesmo para os processos de controlo e monitorização, em detrimento de um PLC.

3 Bancada pneumática de teste

A bancada pneumática de teste é representativa de sistemas pneumáticos industriais e, como tal, disponibiliza componentes pneumáticos de atuação, comando e monitorização. A sua utilização no desenvolvimento e implementação de uma solução baseada em microcontrolador, que permite controlar e monitorizar um sistema pneumático, é de grande interesse.

Tendo em consideração todos os componentes disponíveis, na bancada pneumática de teste é possível monitorizar, por exemplo:

- Pressão nas câmaras do atuador - para deteção de possíveis fugas de ar;
- Temperatura e humidade nas câmaras do atuador - para poder prevenir danos por corrosão no atuador;
- Número de ciclos efetuados - para estimar os ciclos de vida útil dos componentes sujeitos a desgaste, como o atuador e válvulas direcionais;
- Velocidade angular e aceleração - para aferir o impacto do êmbolo no momento em que este atinge as posições extremas do atuador;
- Tempos de ciclo - para verificar se existe diferença nos tempos de ciclo, nas diferentes hipóteses de comando do atuador.

Em termos de *hardware* a bancada pode ser manualmente reconfigurada, de modo a dispor de duas soluções distintas para controlo do atuador linear disponível.

3.1 Bancada pneumática

Os componentes disponíveis na bancada pneumática de teste (Figura 11) são: um atuador linear (A1), uma electroválvula direcional (VD1), duas válvulas fluxométricas (VRC1 e VRC2), três válvulas manométricas (EV1, EV2 e VRP) e diversos sensores: de pressão (P1, P2 e P3), de proximidade (fdc1 e fdc2), de pressão, temperatura e humidade (BME280), de pressão e temperatura (BMP280) e de velocidade angular e de aceleração linear (MPU9250).

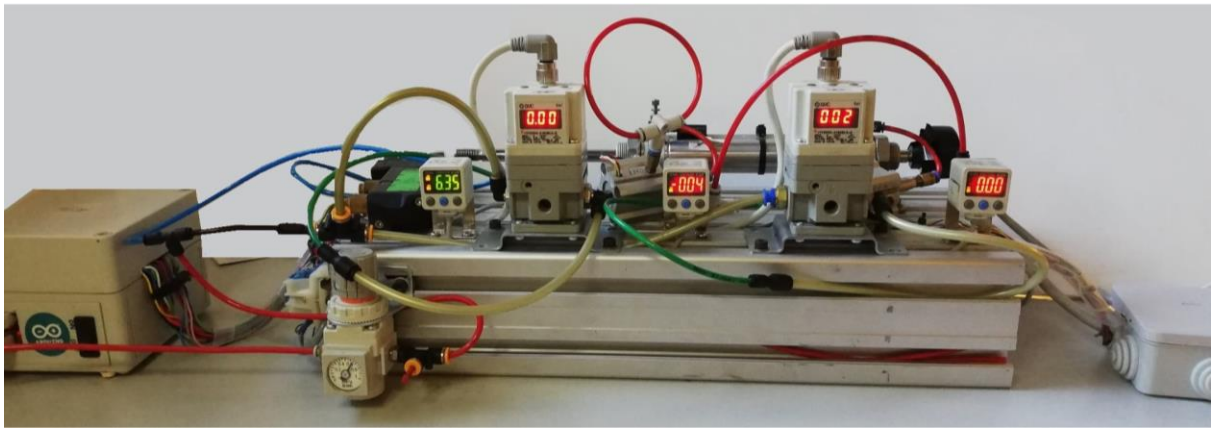


Figura 11 - Bancada pneumática de teste

Como as ligações entre os equipamentos pneumáticos é feita utilizando o sistema de engates rápidos, existe uma grande flexibilidade para poder reconfigurar o circuito pneumático, utilizando os mesmos componentes, ou até para a introdução de novos componentes no mesmo. Assim, foram definidas duas configurações, "sistema pneumático nº1" e "sistema pneumático nº2", cujos circuitos são representados na Figura 12 e na Figura 13, respetivamente. A diferença nas configurações diz respeito à solução de alimentação do atuador linear. Na configuração nº1 é utilizada uma electroválvula direcional (VD1) e na configuração nº2 são utilizadas duas electroválvulas reguladoras de pressão de comando analógico (EV1 e EV2).

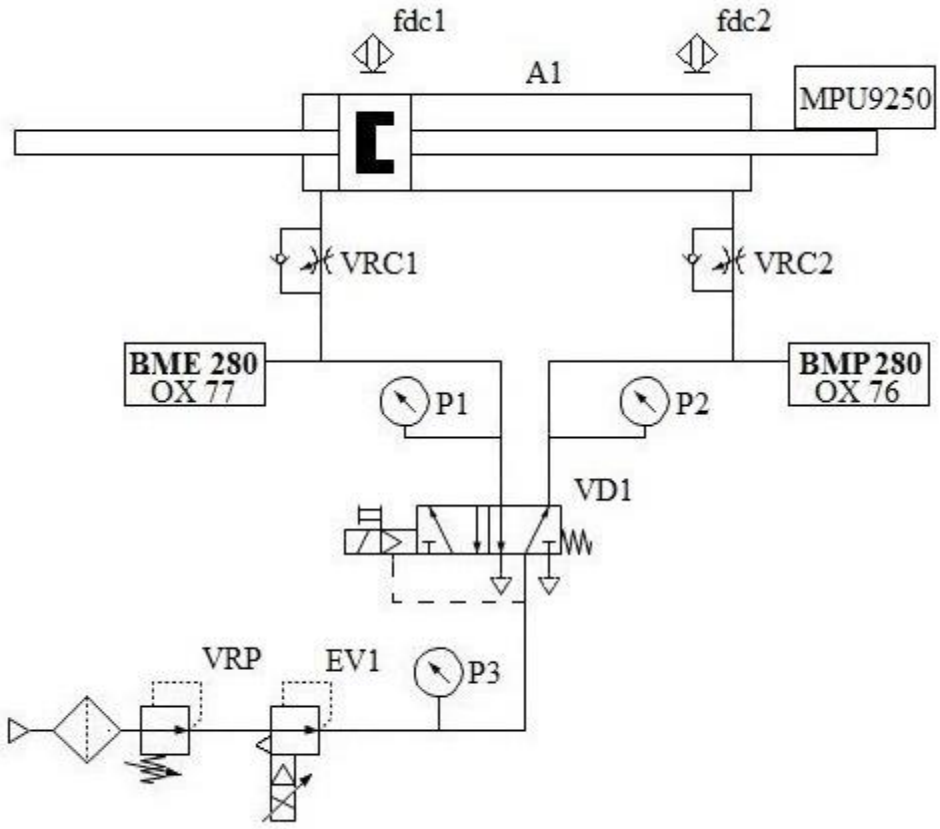


Figura 12 - Configuração "sistema pneumático nº1"

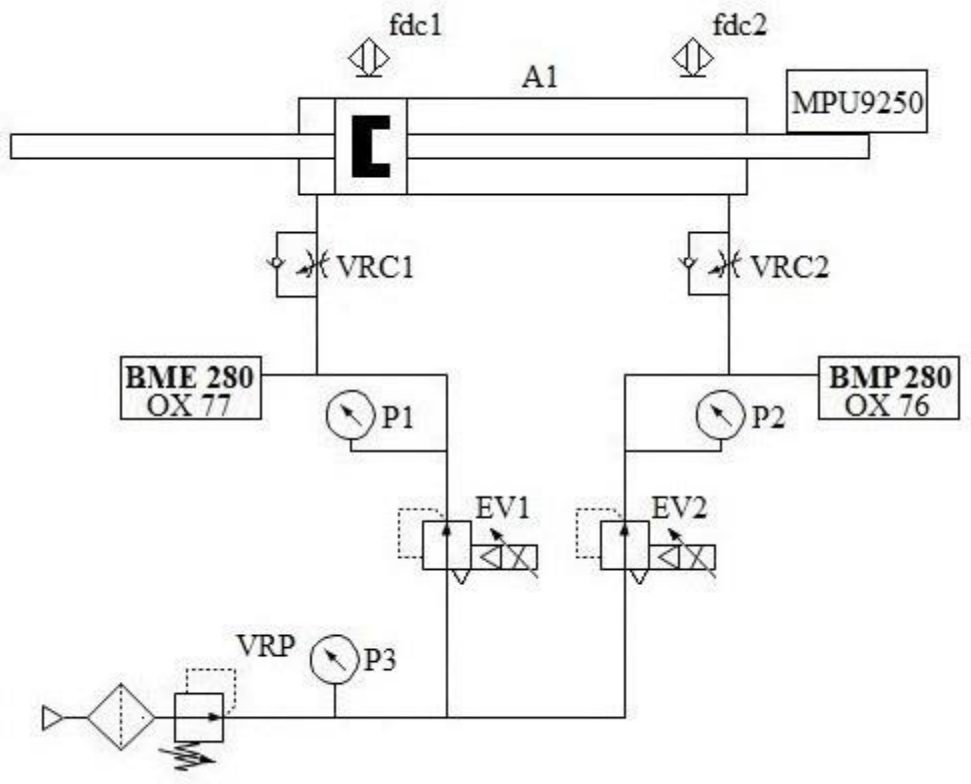


Figura 13 - Configuração "sistema pneumático nº2"

Como pode ser observado na Figura 12 e na Figura 13, a colocação estratégica dos componentes de instrumentação permite monitorizar:

- Pressão de alimentação do sistema pneumático - utilizando o sensor de pressão P3 antes da electroválvula VD1, na configuração "sistema pneumático nº1", e das electroválvulas EV1 e EV2, na configuração "sistema pneumático nº2";
- Pressão, temperatura e humidade do ar na entrada da câmara 1 do atuador (a câmara do lado do sensor fdc1) - utilizando o sensor de pressão P1 e o sensor BME280 na linha de alimentação da câmara do atuador;
- Pressão e temperatura do ar na entrada da câmara 2 do atuador (a câmara do lado do sensor fdc2) - utilizando o sensor de pressão P2 e o sensor BMP280 na linha de alimentação da câmara do atuador;
- Tempo de ciclo - contabilizando o tempo que decorre entre a atuação dos sensores de proximidade, fdc1 e fdc2;
- Número de ciclos efetuados - contabilizando o número de vezes que o solenoide da electroválvula VD1 é ligado ou desligado, na configuração "sistema pneumático nº1", e contabilizando o número de vezes que cada uma das electroválvulas EV1 e EV2 abre e fecha, na configuração "sistema pneumático nº2";
- Velocidade angular e aceleração linear do atuador - utilizando o sensor MPU9250 montado numa das extremidades da haste do atuador linear.

3.2 Componentes pneumáticos

Atuador pneumático

O sistema pneumático possui um dispositivo de atuação. Trata-se de um cilindro padronizado de duplo efeito, simétrico e com êmbolo magnético fabricado pela FESTO (referência: DSNU 193991) (Figura 14). Este atuador segue a norma ISO 6432 e pode funcionar entre as pressões mínima de 1 bar e máxima de 10 bar. Apresenta um curso de 100 mm e diâmetros nominais de haste e de êmbolo de 10 mm e 25 mm, respetivamente [22].



Figura 14 - Atuador FESTO (referência: DSNU 193991)

No atuador estão montadas duas válvulas fluxométricas restritoras de caudal unidirecionais que podem ser ajustadas manualmente para regular a velocidade do atuador. No entanto o ajuste manteve-se inalterado pois a sua variação não seria relevante na solução desenvolvida.

Electroválvula direcional

Na configuração do sistema pneumático nº1 o elemento de comando de potência do sistema pneumático é uma electroválvula de 5 orifícios e 2 posições monoestável com retorno por mola, assistida pneumaticamente (Figura 15). Esta electroválvula direcional (VD1), apresenta corpo em alumínio e necessita de uma tensão de alimentação 24 VDC (Joucomatic modelo 55192009 fabricado pela ASCO, número de catálogo: SCG551A017) [23].

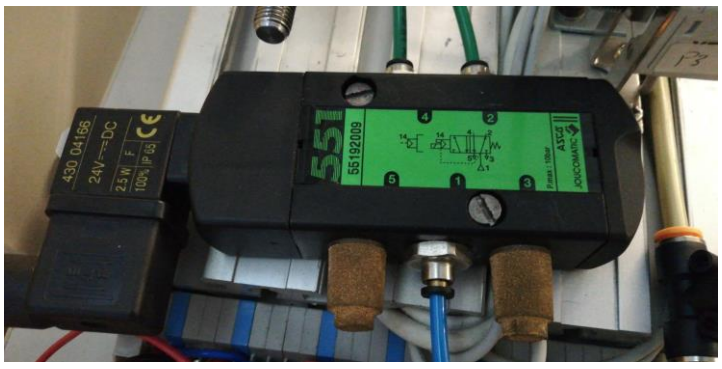


Figura 15 - Electroválvula direcional Joucomatic modelo 55192009

Podendo funcionar para pressões entre os 2 e os 10 bar e temperaturas entre os -25 e os 60 ºC, a electroválvula consome uma potência de 2,5 W, sendo alimentada a 24 VDC. Esta electroválvula apresenta orifícios com um diâmetro nominal de ¼'', o que possibilita, à pressão de 6 bar, um caudal máximo de ar comprimido de 860 l/min.

Válvulas manométricas

Na bancada de teste existem três válvulas manométricas uma delas de ajuste manual (VRP), e duas electroválvulas SMC ITV 2050-21N2BL3-Q (Figura 16), EV1 e EV2. Relativamente à função das electroválvulas, na configuração "sistema pneumático nº1" (Figura 12) apenas é utilizada uma delas (EV1) para regular a pressão de funcionamento do sistema, que pode ser igual ou inferior à ajustada em VRP. Porém, na configuração "sistema pneumático nº2" (Figura 13) são utilizadas ambas, com o objetivo de substituir a função que a elctroválvula direcional desempenha na configuração nº1.

As electroválvulas reguladoras de pressão necessitam ser alimentadas a 24 VDC e a pressão de saída é definida por uma tensão de comando de 0 a 5 VDC. O intervalo da pressão de saída pode ser ajustado manualmente para uma dada gama no intervalo de 0 a 9 bar. Nas válvulas disponíveis na bancada de teste o intervalo de pressões foi ajustado para as pressões mínima de 0 bar e máxima de 6,5 bar. Como é visível na Figura 16 as electroválvulas, EV1 e EV2, dispõem de um *display* para visualização da pressão com uma resolução de 0,01 bar e uma exatidão de ±2% do valor FS e disponibilizam uma saída analógica entre 1 e 5 VDC (não utilizada nesta solução) [24].



Figura 16 - Válvula reguladora de pressão SMC ITV 2050-21N2BL3-Q

A Figura 17 ilustra o circuito de funcionamento das electroválvulas EV1 e EV2. Com o aumento da tensão de comando, a electroválvula de entrada de ar (1) comuta e permite a pressurização da câmara de pilotagem (3) onde a força atuante sobre o diafragma (4) aumenta com o aumento da pressão. Este aumento da força na face superior do diafragma faz com que a válvula de alimentação (5) se abra possibilitando a passagem do ar para a saída da válvula, onde está o sensor de pressão (7) que retorna o valor da pressão na saída para o circuito de controlo (8) das electroválvulas de entrada (1) e saída de ar (2).

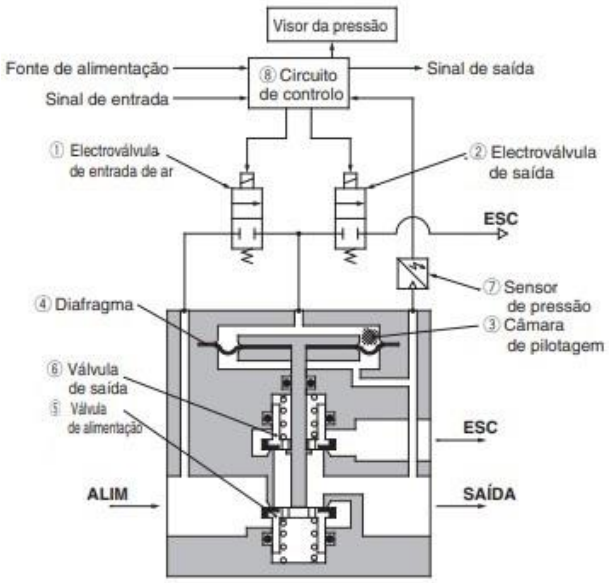


Figura 17 - Circuito de funcionamento das electroválvulas reguladoras de pressão [24]

3.3 Componentes de instrumentação

Sensores de proximidade

Para que seja possível detetar quando o êmbolo do atuador atinge as posições extremas estão acoplados nas suas extremidades dois sensores de proximidade do tipo *Reed Switch*, SMC D-A73 (Figura 18) [25]. A utilização destes fins de curso justifica-se pela característica magnética do êmbolo do atuador que, devido ao seu campo magnético, faz com que o contacto ferromagnético normalmente aberto, presente no sensor, feche com a sua aproximação. Estes sensores têm um tempo de resposta de 1,2 ms.



Figura 18 - Sensor *Reed Switch* SMC D-A73 [25]

Sensores de pressão

Para que a monitorização da pressão seja possível são utilizados três sensores de pressão, P1, P2 e P3, SMC ISE40A (Figura 19) [26]. O posicionamento estratégico dos três sensores permite a medição da pressão em diferentes pontos do sistema, nomeadamente à saída da válvula VRP ou da electroválvula EV1, dependendo da configuração de sistema pneumático implementada, e nas entradas das duas câmaras do atuador pneumático. Segundo o fabricante, estes sensores são alimentados com uma tensão entre 12 e 24 VDC e os valores de pressão medidos são apresentados no display LCD destes sensores com uma exatidão de ±2% do valor FS para uma gama de pressão de -1 a 10 bar. A esta gama de pressões corresponde uma saída analógica em tensão que varia, teoricamente, entre 0,6 e 5 V de forma linear.



Figura 19 - Sensor de pressão com display LCD SMC ISE40A

Por forma a caracterizar o funcionamento dos sensores de pressão, os mesmos foram testados em simultâneo. Para um mesmo valor de pressão ajustado manualmente na válvula reguladora de pressão, utilizada como referência de medição, foi medida a tensão de saída, recorrendo a um multímetro digital. Na Tabela 1 e na Figura 20, são apresentados os resultados do conjunto de medições efetuadas.

Tabela 1 - Resultados obtidos nas medições da tensão de saída dos sensores de pressão para valores de pressão fixos, ajustados manualmente

Pressão ajustada manualmente [bar]	**P1**	**P2**	**P3**
	Tensão medida [V]	**Tensão medida [V]**	**Tensão medida [V]**
0,0	0,991	0,996	0,987
1,0	1,434	1,441	1,433
2,0	1,831	1,838	1,832
3,0	2,204	2,213	2,208
4,0	2,601	2,610	2,606
5,0	2,991	3,000	2,997
6,0	3,386	3,400	3,396

Ainda que haja uma ligeira diferença nos valores de tensão de saída obtidos para os sensores de pressão, P1, P2 e P3, pela observação da Figura 20 é notório que o valor da tensão de saída aumenta de forma aproximadamente linear com o valor de pressão aplicada na válvula reguladora de pressão manual.

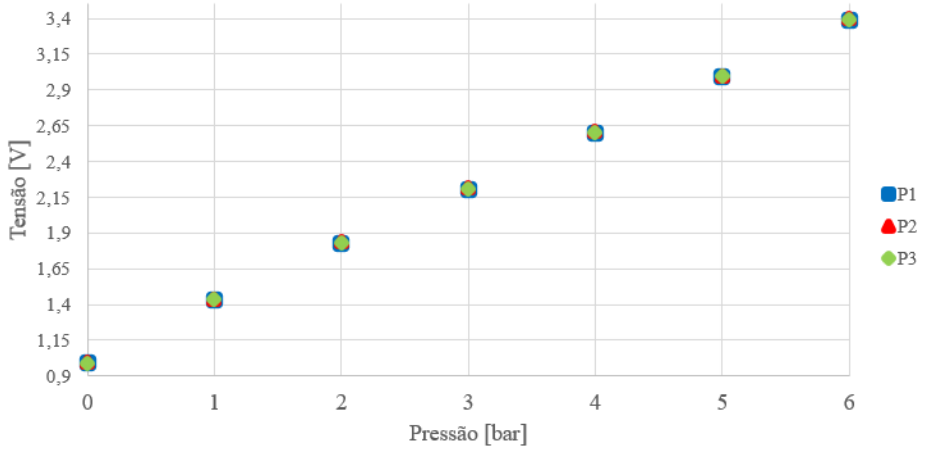


Figura 20 - Representação gráfica dos resultados obtidos no conjunto de medições efetuadas

Assim, para obter a equação característica de cada sensor, procedeu-se a uma aproximação linear, pelo método dos mínimos quadrados, obtendo-se as equações 3.1, 3.2 e 3.3, onde p_1, p_2 e p_3 representam as pressões e V_1, V_2 e V_3 a tensão de saída.

$$V_1 = 0{,}395 \times p_1 + 1{,}020 \quad (3.1)$$

$$V_2 = 0{,}397 \times p_2 + 1{,}025 \quad (3.2)$$

$$V_3 = 0{,}398 \times p_3 + 1{,}016 \quad (3.3)$$

Na Tabela 2 são apresentados os valores de tensão calculados utilizando as equações 3.1, 3.2 e 3.3 e os valores do módulo da diferença entre os valores calculados e os valores medidos, representado por |ΔV|. Assim, com o valor máximo de |ΔV| e a gama de tensões para cada sensor calculou-se a não linearidade de cada sensor.

Tabela 2 - Comparação entre os valores de tensão obtidos e os valores teóricos

P1			**P2**			**P3**		
Tensão medida [V]	**Valor calculado [V]**	**|ΔV|**	**Tensão medida [V]**	**Valor calculado [V]**	**|ΔV|**	**Tensão medida [V]**	**Valor calculado [V]**	**|ΔV|**
0,991	1,016	0,025	0,996	1,025	0,029	0,987	1,012	0,025
1,434	1,458	0,024	1,441	1,465	0,024	1,433	1,453	0,020
1,831	1,850	0,019	1,838	1,857	0,019	1,832	1,847	0,015
2,204	2,221	0,017	2,213	2,230	0,017	2,208	2,220	0,012
2,601	2,613	0,012	2,610	2,626	0,016	2,606	2,614	0,008
2,991	3,000	0,009	3,000	3,011	0,011	2,997	3,004	0,006
3,386	3,395	0,009	3,400	3,407	0,007	3,396	3,401	0,005
Máximo |ΔV|		0,025	**Máximo |ΔV|**		0,029	**Máximo |ΔV|**		0,025

$$\text{Não linearidade}_{p1} = \pm (0{,}025 / (3{,}395 - 1{,}016)) \times 100\ \% = \pm 1{,}05\ \% \quad (3.5)$$

$$\text{Não linearidade}_{p2} = \pm (0{,}029 / (3{,}407 - 1{,}025)) \times 100\ \% = \pm 1{,}22\ \% \quad (3.6)$$

$$\text{Não linearidade}_{p3} = \pm (0{,}025 / (3{,}401 - 1{,}012)) \times 100\ \% = \pm 1{,}05\ \% \quad (3.7)$$

Sensores de pressão, humidade e temperatura

A medição dos valores de temperatura, à entrada das câmaras do atuador pneumático, e de humidade, à entrada da câmara do atuador pneumático cuja pressão é lida no sensor P1, é efetuada utilizando dois sensores: BME280 (Figura 21) [27] e BMP280 (Figura 22) [28], ambos da Bosch. O sensor BME280 permite a obtenção de valores de pressão atmosférica, de temperatura e de humidade enquanto que o sensor BMP280 apenas disponibiliza valores de pressão atmosférica e de temperatura.



Figura 21 - Sensor de pressão, humidade e temperatura BME280 da Bosch [27]



Figura 22 - Sensor de pressão e temperatura BMP280 da Bosch [28]

Ambos os sensores estão encapsulados em corpos de cilindros pneumáticos com volume de, aproximadamente, 16 cm^3 (Figura 23), de forma que, a sua introdução no sistema pneumático não introduz um grande volume de ar morto no sistema. Como pode ser observado na Figura 12 e na Figura 13, o sensor BME280 está colocado na linha de pressão P1 e o sensor BMP280 na linha de pressão P2. Este posicionamento permite comparar a evolução da temperatura nas duas câmaras do atuador e conhecer o valor da humidade relativa do ar comprimido na linha de pressão P1.



Figura 23 - Sensor BMP280 encapsulado no corpo de um cilindro pneumático

Os dados fornecidos acerca destes sensores ([27] [28]) informam que os mesmos podem ser alimentados desde 1,71 até 3,6 V. Assim, é utilizada uma alimentação de 3,3 V disponibilizados pelo microcontrolador. As condições limite em que a sua utilização é possível são as seguintes para ambos: temperaturas de -40 a 85 ºC e humidade relativa dos 0% aos 100%. Relativamente ao sensor de humidade, o tempo de resposta é de 1 segundo, a

exatidão é de ±3% e apresenta uma histerese de 1%. Os valores de temperatura medidos, para ambos, têm resolução e exatidão de, respetivamente, 0,01 ºC e ±1 ºC (entre 0 e 65 ºC).

É ainda importante referir que estes sensores são desenvolvidos para monitorização do ar ambiente, à pressão atmosférica. Contudo, neste sistema poderão ser sujeitos a pressões até seis vezes superiores, o que poderá condicionar a medição dos valores de humidade e temperatura.

Sensores de velocidade angular e de aceleração

Para medição dos valores da velocidade angular e da aceleração linear do atuador utilizou-se um módulo (*Motion Processing Unit*™, da TDK InvenSense, o MPU9250 [29]) que integra um conjunto de sensores integrados numa placa de circuito impresso (Figura 24). Este módulo é composto por um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro. No sistema em descrição apenas serão considerados os dois primeiros.



Figura 24 - Módulo MPU9250

3.4 Síntese

Nesta secção são expostos, detalhadamente, a bancada pneumática de teste do LIM e todos os componentes, tanto pneumáticos, como de instrumentação, que são disponibilizados.

São, também, apresentadas as duas configurações de sistema pneumático definidas, nas quais pode ser implementada a solução de controlo e monitorização desenvolvida, e faz-se a caracterização dos sensores de pressão, P1, P2 e P3, recorrendo-se a um conjunto de medições que permitem a obtenção da função característica e o cálculo da não linearidade de cada um deles.

4 Arquitetura do sistema de controlo e monitorização

Na definição da arquitetura do sistema de controlo e monitorização a desenvolver devem ser tidas em consideração as seguintes funções a desempenhar pelo mesmo:

- Aquisição e processamento dos sinais provenientes dos diferentes componentes de instrumentação;
- Comando das electroválvulas, VD1, EV1 e EV2;
- Armazenamento da informação em base de dados e disponibilização da mesma numa página *web* (interface).

Na Figura 25, é representado um esquema da arquitetura da solução de controlo e monitorização adotada.

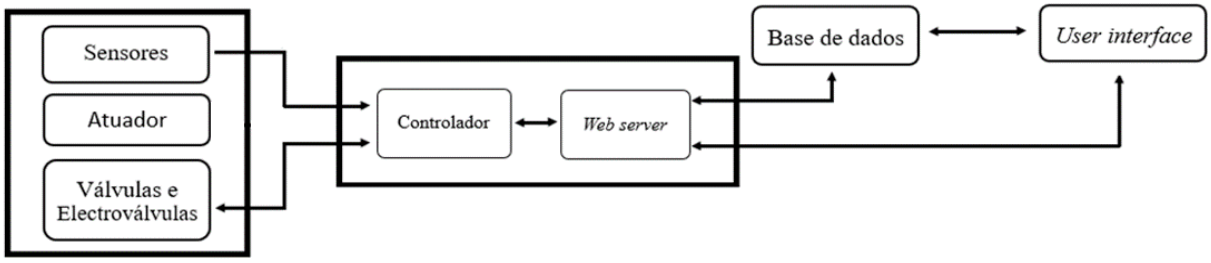


Figura 25 - Arquitetura da solução de controlo e monitorização

4.1 Microcontrolador, módulos adicionais e comunicação

Para que a solução de controlo e monitorização do sistema pneumático seja desenvolvida e implementada com sucesso, é imperativo que o microcontrolador escolhido satisfaça alguns requisitos em relação ao número de entradas e saídas, tanto analógicas como digitais, e à forma como é executada a comunicação.

No que diz respeito às entradas e saídas, o microcontrolador deve possuir:

- Três entradas analógicas - para leitura da saída analógica dos sensores de pressão;
- Duas entradas digitais - para leitura do estado lógico dos sensores de proximidade;
- Uma saída digital - para controlo da electroválvula direcional, VD1;
- Duas saídas PWM - para controlo das electroválvulas reguladoras de pressão, EV1 e EV2.

Em relação à comunicação, o microcontrolador deverá suportar o protocolo de comunicação I^2C, para aquisição dos valores medidos pelos sensores BME280, BMP280 e MPU9250, e ainda ter a capacidade de ligação à internet para envio e registo da informação em base de dados e receber ordens de comando.

O microcontrolador escolhido é um ATmega2560, disponibilizado numa placa Arduino Mega 2560. A integração deste com alguns módulos adicionais faz com que possam ser satisfeitos todos os requisitos já enunciados. O Arduino Mega 2560 disponibiliza 16 entradas analógicas (0 a 5 V), um conversor A/D de 10 bits (0 a 1023) e 54 portas digitais configuráveis, das quais 15 podem funcionar como saídas PWM (*Pulse-width modulation*) [30]. De referir ainda que as entradas analógicas poderão funcionar como portas digitais se assim forem configuradas. Disponibiliza, também, dois níveis de alimentação (3,3 V e 5 V) e permite distintos protocolos de comunicação (I^2C, *Serial* e SPI) entre o microcontrolador e outros equipamentos.

O Arduino Mega 2560 [31] é uma placa de desenvolvimento com um microcontrolador ATmega2560 [32], que possui um *clock* de 16 MHz e um processador AVR 8-bit. O microcontrolador dispõe de toda eletrónica necessária ao funcionamento desta plataforma *open source* sendo apenas necessário o carregamento do programa desenvolvido no seu *software* IDE (*Integrated Development Environment*). Esta característica faz deste tipo de equipamento tão flexível como simples de implementar.

A alimentação da placa Arduino Mega, pode ser efetuada de duas formas: utilizando a porta USB (tipo B) para uma tensão de alimentação de 5 V ou utilizando uma fonte DC com tensão de alimentação recomendada entre 7 e 12 V. Na solução desenvolvida foi utilizada uma alimentação de 5 V.

Módulo Ethernet e comunicação segundo o protocolo SPI

O *Ethernet Shield 2* [33], baseado no *chip Wiznet* W5500 *Ethernet* [34] tem como principal funcionalidade possibilitar a ligação da placa Arduino Mega 2560 a uma rede, seja essa local ou de internet, utilizando um cabo de rede RJ45. Este módulo permite até 8 ligações *sockets* independentes simultaneamente e suporta os seguintes protocolos: TCP, UDP, ICMP, IPv4, ARP, IGMP e PPPoE. A identificação do *Ethernet Shield 2* na rede é feita pelo endereço *Media Access Control* (MAC), único na rede, 0x90-0xA2-0xDA-0x11-0x05-0x0E.

A comunicação entre o microcontrolador e o *Ethernet Shield 2* é estabelecida de acordo com o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), um protocolo para comunicações de curtas distâncias. Este é um protocolo de comunicação série do tipo ponto-a-ponto *full-duplex* (cada equipamento será emissor e recetor simultaneamente) e segue o modelo de *Master/Slave*, sendo apenas possível o uso de um *Master*. Por se tratar de um protocolo de comunicação síncrono, é necessária a utilização de um sinal de *clock* (relógio) controlado pelo *Master*, que controla todos os *timings* da comunicação.

Para que a comunicação SPI seja exequível com um *Master* e um *Slave* são necessárias, tipicamente, quatro ligações: MOSI, MISO, SCK e SS. As ligações MOSI (*Master Output Slave Input*) e MISO (*Master Input Slave Output*) são responsáveis pela troca de informação enquanto as ligações SCK (*Serial Clock*) e SS (*Slave Select*) são responsáveis pelo controlo e direcionamento dessa informação. No entanto, entre o *Master*, Arduino Mega 2560, e o *Slave*, *Ethernet Shield 2* apenas são utilizadas as ligações físicas nos pinos MOSI, MISO e SCK. Contudo, o pino que, por defeito, seria o SS (o pino digital 53) deverá ser configurado como saída para que a comunicação SPI funcione corretamente [35]. Na Figura 26 é apresentado um esquema da forma como são feitas as ligações para a comunicação SPI na solução de controlo e monitorização desenvolvida.

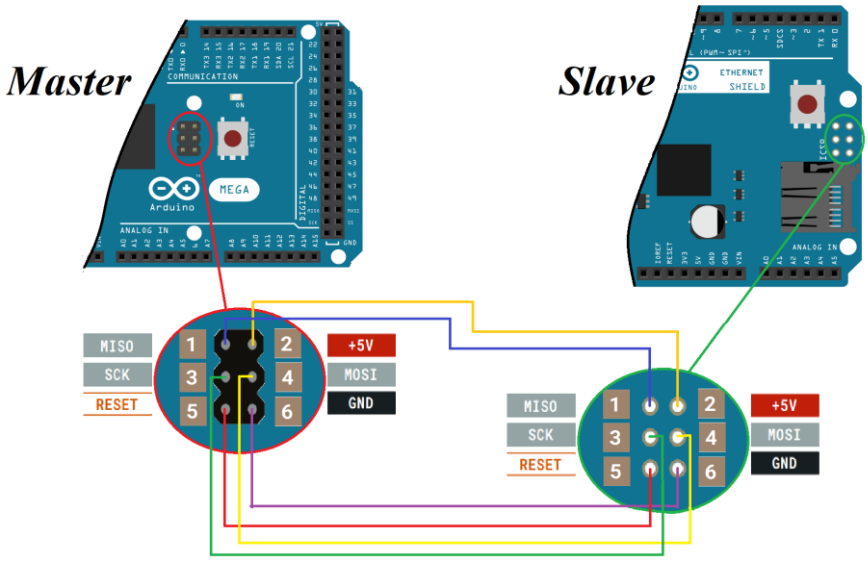


Figura 26 - Ligações para comunicação SPI entre o Arduino Mega 2560 e o *Ethernet Shield 2*

Módulo de 4 relés

Como descrito na secção 3.2, o solenoide da electroválvula direcional é alimentado a uma tensão de 24 VDC pelo que a tensão disponível nas saídas do Arduino Mega 2560 (5 V) é demasiado baixa para que seja possível o controlo da electroválvula diretamente a partir das suas saídas digitais. Para que tal possa acontecer torna-se imprescindível a utilização de um relé, na interface entre os dois circuitos

O Arduino *4 Relay Shield* [36] é uma solução idealizada para casos em que a tensão de alimentação dos equipamentos a controlar é superior à disponibilizada nas saídas digitais das placas Arduino. Como o próprio nome indica, nada mais é do que um módulo que integra um conjunto de quatro relés eletromecânicos com dois contactos, um NO (*normally open*) e outro NC (*normally closed*). Cada um dos quatro relés tem a si associado um sinal luminoso (led) que indica o estado do relé. Os relés disponíveis neste módulo são fabricados pela Finder e pertencem à série 30 e a sua condição limite de operação é de 2 A para 30 VDC e para os 5 V da placa Arduino Mega 2560 cada bobina consome aproximadamente 40 mA [37].

Na Figura 27 está representada a solução de comando utilizada para o solenoide da electroválvula e, assim como no relé, é utilizado um díodo para proteção do solenoide evitando picos de tensão. O relé utilizado na solução desenvolvida é o relé 2, controlado pelo pino digital 7 do microcontrolador.

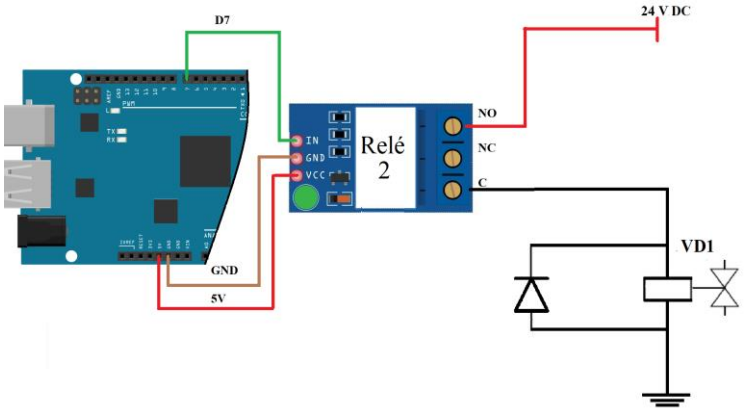


Figura 27 - Solução de comando utilizada para o solenoide da electroválvula (VD1)

Comunicação entre o microcontrolador e os sensores

A comunicação entre o microcontrolador e os diversos sensores utilizados pode ser, por uma questão de simplificação, dividida em dois grandes grupos: aquela em que é utilizado o protocolo I^2C, *Inter-Integrated Circuit*, e aquela em que apenas são utilizadas as entradas digitais e analógicas. Neste último inserem-se os sensores de pressão (entradas analógicas) e os sensores de proximidade (entradas digitais), já os restantes pertencem ao primeiro grupo.

Uma vez que as saídas analógicas em tensão dos três sensores de pressão variam entre 0,6 e 5 V não existe qualquer necessidade de fazer condicionamento de sinal, uma vez que as entradas analógicas do Arduino Mega 2560 podem ler valores de tensão entre 0 e 5 V. Assim sendo, a comunicação de cada um destes sensores com o microcontrolador é conseguida ligando a sua saída em tensão a uma entrada analógica do Arduino Mega 2560 (A1 para o sensor P1, A3 para o sensor P2 e A2 para o sensor P3). O conversor A/D de 10 *bits* faz a conversão dos valores da tensão analógica para um valor entre 0 e 1023.

À semelhança do procedimento efetuado na secção 3.3, foram realizadas diversas medições para caracterizar a relação existente entre a pressão visualizada no *display* dos sensores de pressão, a sua tensão de saída e a saída do conversor A/D do microcontrolador, para o mesmo valor ajustado manualmente na válvula reguladora de pressão. Os resultados dessas medições são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre a pressão e a saída do conversor A/D do microcontrolador, para o mesmo valor ajustado manualmente na válvula reguladora de pressão manual

Pressão ajustada na VRP [bar]	**P1**			**P2**			**P3**		
	Pressão		**Saída conversor A/D [0-1023]**	**Pressão**		**Saída conversor A/D [0-1023]**	**Pressão**		**Saída conversor A/D [0-1023]**
	Display [bar]	**Tensão [V]**		**Display [bar]**	**Tensão [V]**		**Display [bar]**	**Tensão [V]**	
0,0	-0,01	0,991	211	0,00	0,996	212	-0,01	0,987	209
1,0	1,11	1,434	305	1,11	1,441	306	1,1	1,433	303
2,0	2,10	1,831	390	2,1	1,838	391	2,09	1,832	389
3,0	3,04	2,204	471	3,04	2,213	472	3,03	2,208	470
4,0	4,03	2,601	556	4,04	2,610	557	4,02	2,606	556
5,0	5,01	2,991	640	5,01	3,000	641	5,00	2,997	640
6,0	6,01	3,386	724	6,01	3,400	726	6,00	3,396	725

Aplicou-se uma regressão linear aos valores da Tabela 3 para que a partir do valor da saída do conversor A/D do Arduino, fosse possível estimar o valor de pressão em bar. Como resultado foram obtidas as equações 4.1, 4.2 e 4.3, onde p_1, p_2 e p_3 representam as pressões e m1, m2 e m3 representam os valores da saída do conversor A/D do Arduino Mega 2560, para cada um dos sensores lidos.

$$p_1 = 0{,}0117 \times m_1 - 2{,}470 \quad (4.1)$$

$$p_2 = 0{,}0117 \times m_2 - 2{,}469 \quad (4.2)$$

$$p_3 = 0{,}0116 \times m_3 - 2{,}432 \quad (4.3)$$

Os dois sensores de proximidade (fins de curso) estão ligados nas entradas digitais D5 e D6. Desta forma o estado do pino digital deverá ser *HIGH* quando o fim de curso está atuado e *LOW* no caso oposto. Para garantir que o estado da entrada digital será *LOW* quando o fim de curso não está atuado é utilizada uma resistência *pull-down* de 10 kΩ.

A Figura 28 apresenta o esquema das ligações dos diferentes sensores ao microcontrolador.

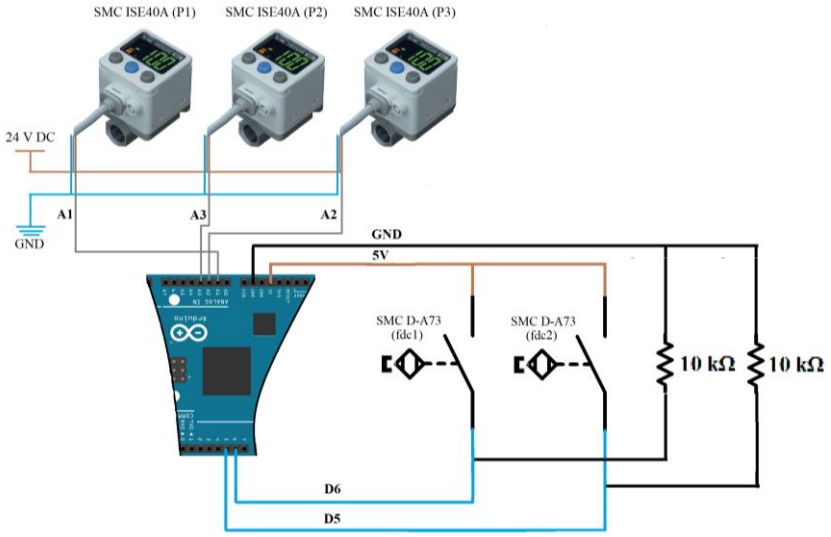


Figura 28 - Esquema da ligação dos sensores de proximidade e pressão ao Arduino Mega 2560

Os sensores integrados de temperatura, humidade, velocidade angular e aceleração linear já possuem o condicionamento de sinal necessário e comunicam com o microcontrolador utilizando o protocolo de comunicação I^2C.

À semelhança do já descrito protocolo SPI, o protocolo I^2C é um protocolo de comunicação do tipo *Serial* que segue o modelo *Master/Slave*. O barramento I^2C tem a particularidade de apenas utilizar duas ligações, SDA e SCL, entre *Master* e *Slave*, além da alimentação, o que minimiza o número de ligações necessárias. A ligação *Serial Data* (SDA) é a responsável pela troca de informação entre os equipamentos ligados no barramento, e a ligação *Serial Clock* tem como função definir os instantes da troca de informação. O microcontrolador disponibiliza quatro pinos para a comunicação I^2C, dois pinos SDA (D20 e SDA) e dois pinos SCL (D21 e SCL). Para que o *Master*, Arduino Mega 2560, saiba com que *Slave* está a trocar informação todos os equipamentos ligados ao barramento I^2C deverão ter um endereço próprio. Na solução de controlo e monitorização desenvolvida os endereços utilizados são: 0x76 para o sensor BMP280, 0x77 para o sensor BME280 e 0x68 para o sensor MPU9250. Na alimentação do barramento I^2C são tipicamente usados 3,3 ou 5 V.

Na Figura 29 são representadas as ligações dos sensores que suportam comunicação I^2C ao microcontrolador.

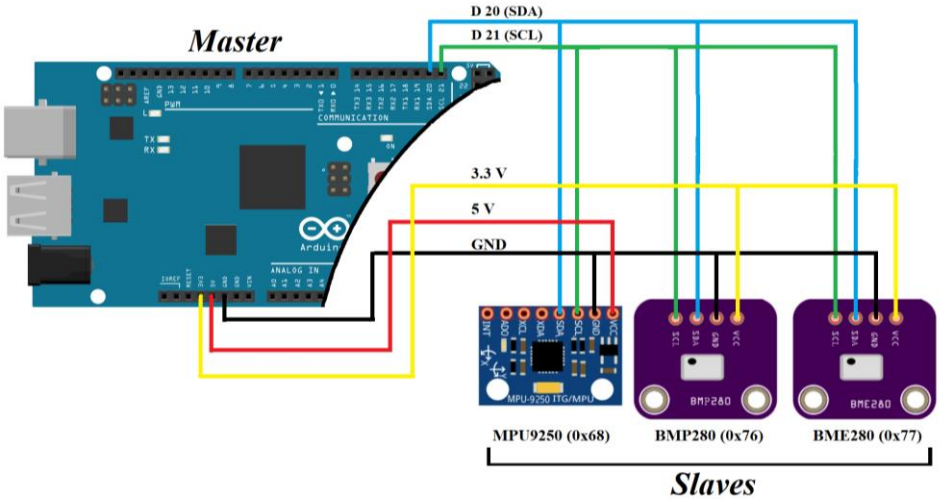


Figura 29 - Esquema das ligações utilizadas para a comunicação seguindo o protocolo I^2C entre sensores e Arduino Mega 2560

De forma a caracterizar os valores medidos para cada uma das componentes da velocidade angular e da aceleração linear, efetuou-se um conjunto de leituras, à frequência de 35 Hz, enquanto o sistema pneumático se encontrava em repouso e o atuador linear na posição inicial. Uma vez que, quando o sistema pneumático se encontra neste estado de funcionamento, a única força de aceleração que atua sobre o atuador linear é a aceleração gravítica, esse será o valor da componente do vetor aceleração segundo essa direção que, tendo em conta o posicionamento do sensor, é a componente segundo a direção z. Os valores das componentes do vetor aceleração segundo as restantes direções deverão ser nulos, assim como as componentes do vetor velocidade, segundo as três direções. Na Figura 30 e na Figura 31 são apresentados os resultados obtidos nesse conjunto de leituras.

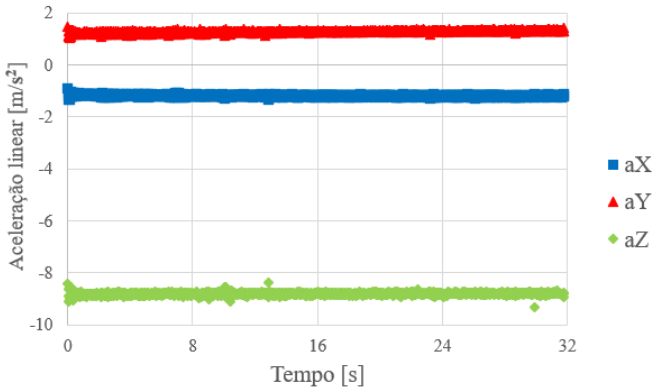


Figura 30 - Resultado das medições dos valores de aceleração segundo as três direções

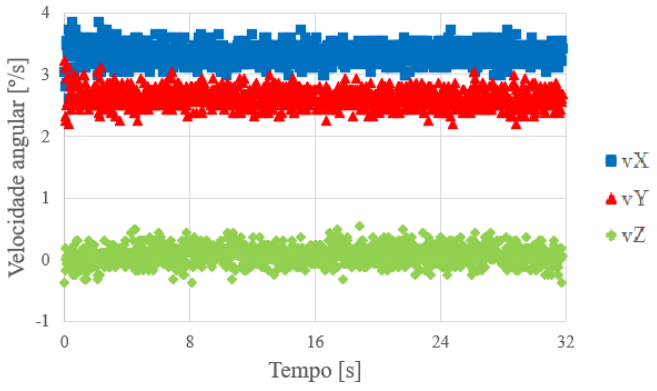


Figura 31 - Resultado das medições dos valores da velocidade angular segundo as três direções

Da análise dos resultados obtidos, verificou-se a existência de algum ruído na leitura dos valores e de um *offset*. Para compensação deste último, foi calculado o valor médio das leituras para cada uma das componentes e a sua diferença para o valor esperado, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de *"offset"* nas componentes segundos as três direções dos vetores aceleração e velocidade angular

	Aceleração [m/s^2]			Velocidade angular [º/s]		
Componente na direção	**Valor médio**	**Valor esperado**	**Valor "*Offset*"**	**Valor médio**	**Valor esperado**	**Valor "*Offset*"**
x	-1,19	0,00	1,19	3,34	0,00	-3,34
y	1,29	0,00	-1,29	2,63	0,00	-2,63
z	-8,80	-9,81	-1,01	0,07	0,00	-0,07

"Módulo" *Pulse-Width Modulation*

Como já referido na descrição do Arduino Mega 2560, algumas das suas portas digitais podem ser configuradas como saídas PWM, o que permite simular a obtenção de um sinal analógico pela pulsação de um sinal digital, sem qualquer conversão A/D ou D/A desse mesmo sinal. Assim, uma tensão de saída que seria de 0 ou 5 V poderá ter valores intermédios, correspondentes à variação da largura do pulso. Isto faz com que o valor da tensão de saída na porta PWM passe a ser a média ponderada da tensão do ciclo, por exemplo, se a frequência do sinal é 100 Hz e é definido que o sinal é de 5 V durante 8 ms (80% do ciclo), é como se o sinal fosse de 4 V.

Na solução desenvolvida são utilizadas duas portas digitais (D3 e D9) configuradas, por *software*, como saídas PWM, para o controlo das electroválvulas EV1 e EV2 (Figura 32). Esta configuração das portas é feita no programa desenvolvido, definindo-as como saídas, ajustando a sua frequência para 31372,55 Hz, neste caso, e definindo a largura do pulso do sinal digital, utilizando um valor entre 0 e 255, em que o primeiro corresponde a 0% do ciclo e o segundo corresponde a 100% do ciclo.

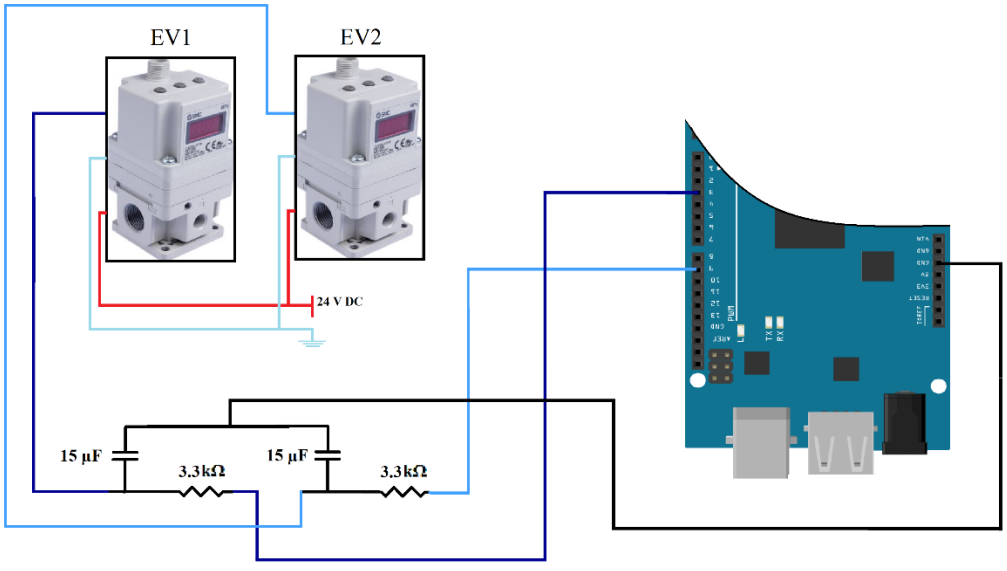


Figura 32 - Esquema das ligações das electroválvulas às portas PWM do Arduino Mega 2560

Para utilização das electroválvulas EV1 e EV2, foi ajustado manualmente em cada uma delas o ganho para a relação tensão de entrada/pressão de saída, [0 V, 5V]/[0 bar, 6,5 bar], onde a tensão é definida pelo valor de referência da saída PWM. Foram realizados alguns ensaios, para obtenção da pressão de saída para diferentes referências da saída PWM. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 33.

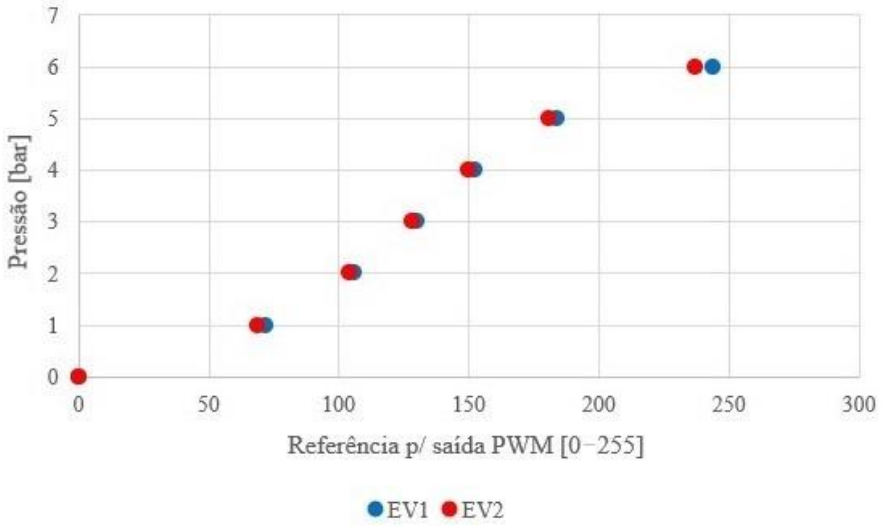


Figura 33 - Relação entre os valores de referência para as saídas PWM e as pressões nas saídas de EV1 e EV2

Pela observação da Figura 33, é possível verificar que as electroválvulas, EV1 e EV2, têm respostas à tensão de comando ligeiramente diferentes e que a distribuição dos vários pontos não segue uma característica linear.

4.2 Solução de controlo e monitorização desenvolvida

Para implementação da solução de controlo e monitorização foi desenvolvido um programa utilizando o *software* IDE da plataforma Arduino. O programa é composto por diversas funções que são executadas sequencialmente, fazendo com que o microcontrolador funcione como uma máquina de estados.

Inicialmente, são incluídas todas as bibliotecas necessárias para o uso dos protocolos de comunicação, são definidos os pinos que são utilizados e a sua função, *input* ou *output*, e inicializadas todas as variáveis utilizadas no programa. Nesta "etapa" do programa, são também definidos os *Timers* utilizados, para o controlo das portas PWM e para gerar a interrupção onde é feita a aquisição e o registo da informação em base de dados.

Esta rotina de interrupção, controlada pelo *Timer4* (Figura 34), corresponde à solução de monitorização, uma vez que, aquando da sua ocorrência são executadas as funções:

- *dataAcquisition()* - onde são lidos e processados todos os sinais recebidos dos componentes de instrumentação e gerada uma *String* que contém toda a informação a ser registada em base de dados;
- *send_toDB()* - onde é aberta a ligação à base de dados e enviada a informação, utilizando a *String* gerada na função anterior.

```
ISR(TIMER4_OVF_vect){
  sei();
  TIMSK4 &= ~_BV(TOIE4);
  dataAcquisition();
  send_toDB();
  TIMSK4 |= (1 << TOIE4);
  TCNT4 = timerCount;
  cli();
}
```

Figura 34 - *Script* da rotina de interrupção

A frequência à qual é gerada a interrupção pode ser ajustada, utilizando a interface, sendo a frequência de aquisição máxima conseguida de 35 Hz.

Após a inicialização das variáveis, é executada a função *initalTest()*, onde são testados os sensores BMP280, BME280 e MPU9250 e caso haja algum sensor que não passe nesse teste, é exibida a mensagem de erro no *web server*, indicando qual ou quais sensores não estão operacionais, e efetuado um *scanI2C()* para verificar todos os sensores ligados ao barramento I^2C. Seguidamente, são feitos os testes de pressão, *highPressureTest()* e *lowPressureTest()*, para verificar a operacionalidade das electroválvulas, EV1 e EV2. Neste teste, são ajustados os valores, máximo e mínimo, de referência para cada saída PWM e medida a pressão utilizando os três sensores, se as condições definidas no programa forem satisfeitas, o resultado do teste é positivo e o sistema é dado como apto para funcionar, caso contrário, o resultado é negativo e é exibida a mensagem de erro no *web server*, indicando qual dos testes não foi bem-sucedido e o sistema é dado como inapto para funcionar.

Finalizados os testes, o programa entra num *loop*, de onde só sai quando o microcontrolador deixa de ser alimentado, e aguarda a especificação dos parâmetros de funcionamento do sistema, que é feita utilizando a interface, onde são enviados todos os parâmetros para o microcontrolador através do endereço do *web server* utilizando o método GET. Quando a especificação dos parâmetros é feita e enviada para o microcontrolador, é executada a função *ProcessValue()* que descodifica a mensagem recebida, utilizando o comando *substring*, e faz a atribuição dos parâmetros recebidos às variáveis correspondentes no programa. Um destes parâmetros é o *routine_name*, que corresponde ao nome do programa a ser executado pelo sistema.

Tendo em conta as duas configurações do sistema pneumático já expostas na secção 3.1, foram desenvolvidos quatro programas, dois para cada configuração do sistema pneumático, *Test* e *Extend and retract cycle*. O programa *Test*, como o próprio nome sugere, é um programa que tem como finalidade verificar se a implementação manual da configuração do sistema pneumático escolhida foi feita corretamente e o seu princípio de funcionamento é o mesmo em ambas as configurações do sistema pneumático. Neste programa, não é necessária qualquer definição de parâmetros de funcionamento, uma vez que estão já definidos na programação. O programa permite que o atuador efetue quatro ciclos de movimentos vai/vem incrementando a pressão em cada um desses ciclos. Já o programa *Extend and retract cycle* permite efetuar movimentos de vai/vem com a possibilidade de o atuador poder parar, por um intervalo de tempo programável, nas posições em que os sensores de proximidade estão atuados. O princípio de funcionamento é idêntico em ambas as configurações do sistema pneumático, mas é necessária a definição de um conjunto de parâmetro diferentes para cada uma delas. Na configuração "sistema pneumático nº1" os parâmetros a definir são: o número de movimentos (dois movimentos correspondem a um ciclo de vai/vem), a pressão de funcionamento do circuito regulada na electroválvula reguladora de pressão EV1, os tempos

de paragem quando os fins de curso estão atuados (*forward delay* para fdc2 e *backward delay* para fdc1) e um de três níveis de frequência de aquisição e registo da informação em base de dados. Na configuração "sistema pneumático nº2", além do número de movimentos, dos tempos de paragem e da frequência de aquisição e registo da informação em base de dados, são definidas as pressões de avanço e de recuo, reguladas nas electroválvulas reguladoras de pressão EV1 e EV2, respetivamente.

Na Figura 35 é apresentado um esquema que resume a solução de controlo implementada.

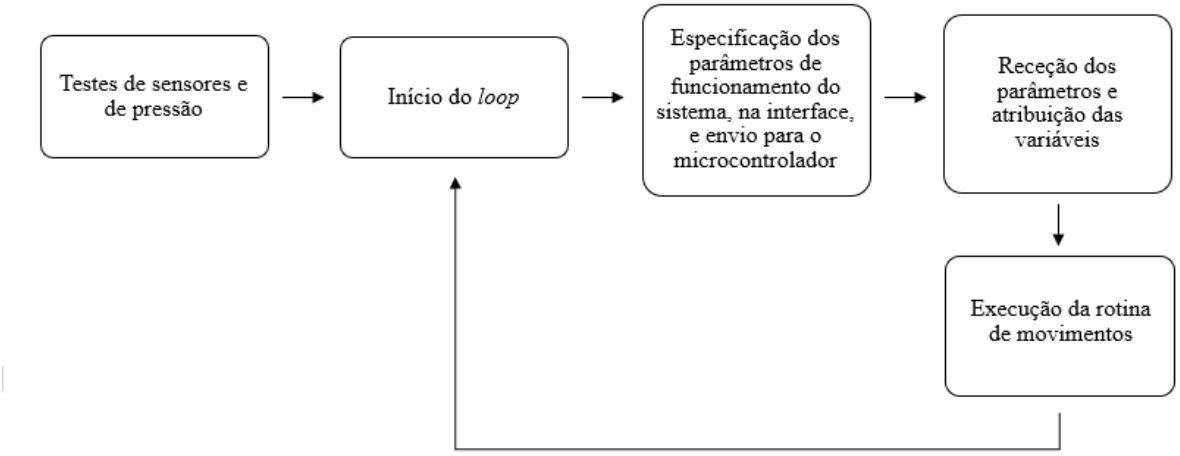


Figura 35 - Esquema de implementação da solução de controlo

4.3 Síntese

Nesta secção, são apresentados os requisitos do sistema de controlo e, por consequência, os requisitos que devem ser satisfeitos pelo microcontrolador a utilizar nesta aplicação didática. Tendo em consideração todos eles, o microcontrolador escolhido é um ATmega2560, disponibilizado numa placa Arduino Mega 2560.

Após a exposição dos critérios tidos em conta na escolha do microcontrolador, é feita uma caracterização mais detalhada deste, dos módulos adicionais (*Ethernet Shield 2* e *4 Relays Shield*) e dos protocolos de comunicação utilizados pelo microcontrolador, para comunicar com os diversos componentes de instrumentação e com os módulos adicionais.

Por fim, são apresentadas as soluções de controlo, fazendo-se uma descrição dos diferentes programas que podem ser efetuados utilizando a solução desenvolvida, e de monitorização, expondo a forma como é feita a aquisição da informação e registo da mesma.

5 Desenvolvimento da interface de controlo e monitorização

A ligação do microcontrolador a uma rede local, utilizando o *Ethernet Shield 2* e um cabo de rede *Ethernet*, permite-lhe receber e enviar informação de e para outros equipamentos ligados a essa mesma rede. Esta ligação dos equipamentos à rede local pode ser realizada via cabo de rede *Ethernet* ou via Wi-Fi. Contudo, é recomendável que seja utilizado um cabo de rede *Ethernet* para uma ligação mais estável, permitindo dispor de frequências de registo de dados mais elevadas.

Neste sistema pneumático, pretende-se que o microcontrolador receba informação dos dispositivos de monitorização e, utilizando o *Ethernet Shield 2*, a envie para uma base de dados, onde possa ser armazenada e posteriormente disponibilizada para outros PC's na rede. Para isso utilizou-se um *software open-source* que possibilita a criação de um servidor *web* local, XAMPP (www.apachefriends.org/index.html), que disponibiliza um conjunto de recursos, que permitem gerar páginas *web* e aceder a bases de dados, das quais são usadas:

- Apache - servidor *web*;
- MariaDB/MySQL - gerenciadores de bases de dados;
- PHP - linguagem de programação utilizada no desenvolvimento de páginas *web* e acesso a bases de dados;
- phpMyAdmin - aplicação *web* que permite a criação de bases de dados e tabelas, onde é possível inserir e manipular informação.

Assim sendo, o PC onde foi instalado o XAMPP passa a ser o servidor da rede local responsável pela disponibilização da informação armazenada em base de dados para qualquer cliente ligado à mesma rede. Na Figura 36 é possível observar a arquitetura da rede local utilizada.

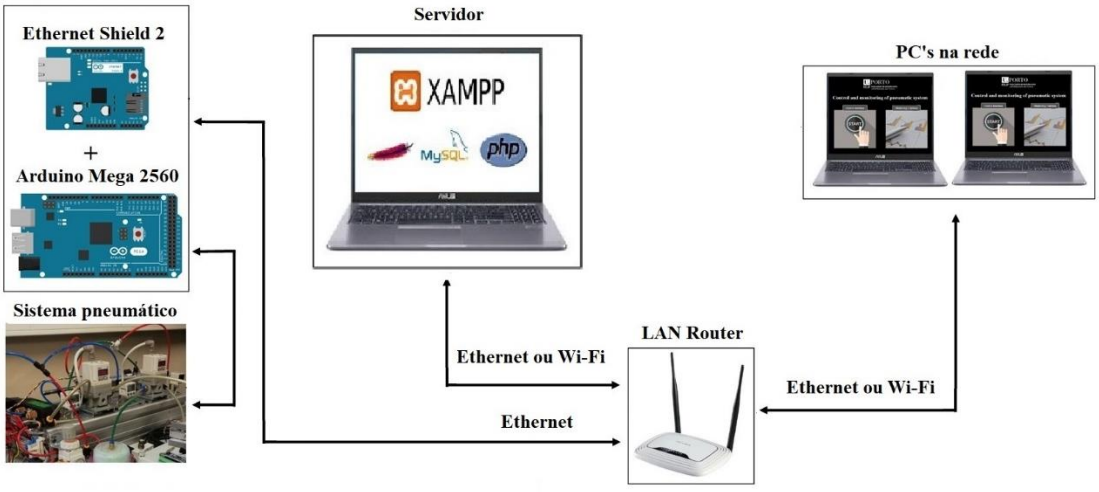


Figura 36 - Arquitetura da rede local

5.1 Registo da informação em base de dados

O registo dos parâmetros relativos ao sistema pneumático foi efetuado com recurso ao phpMyAdmin que, como já referido, é uma aplicação disponibilizada pelo XAMPP e permite a criação de bases de dados e tabelas para inserção de informação. Assim sendo, utilizou-se o phpMyAdmin para criar a base de dados *pneumaticsystem* e, inserida nesta, a tabela *pneumatic_system_data*, onde é armazenada toda a informação enviada, referente aos parâmetros monitorizados.

Os registos inseridos na tabela *pneumatic_system_data*, são identificados por um ID que incrementa automaticamente a cada novo registo. Por sua vez, cada registo é composto por:

- SessionCounter - identifica cada sessão efetuada. Cada vez que o microcontrolador é reiniciado as variáveis no programa são inicializadas e o seu valor é, por defeito, 0;
- fdc1 e fdc2 - indicam o valor lógico dos sensores de proximidade fdc1 e fdc2, respetivamente;
- humidade1 - o valor da humidade relativa (%) do ar comprimido na câmara alimentada à pressão 1;
- pressao1, pressao2 e pressao3 - os valores de pressão, em bar, lidos nos sensores de pressão P1, P2 e P3, respetivamente;
- temperatura1 e temperatura2 - os valores de temperatura, em ºC, medidos nas câmaras do atuador pneumático e correspondem à câmara alimentada à pressão 1 e à câmara alimentada à pressão 2, respetivamente;
- comando - indica o valor lógico da atuação da electroválvula direcional;
- comandoev1 - indica o valor de referência para a saída PWM que comanda da electroválvula EV1, entre 0 e 255;
- comandoev2 - indica o valor de referência para a saída PWM que comanda da electroválvula EV2, entre 0 e 255;
- arduinoTimeStamp - indica o tempo decorrido, em milissegundos, desde que o microcontrolador é iniciado;
- SessionTime - indica o tempo decorrido, em milissegundos, desde o início de cada sessão;
- timeStamp - indica a data e hora em que foi efetuado o registo na base de dados;
- acelx, acely e acelz - indicam os valores das componentes do vetor aceleração, em m/s^2;
- gyrox, gyroy e gyroz - indicam os valores das componentes do vetor velocidade angular, em º/s.

Como é possível verificar na Figura 37, o phpMyAdmin pode também ser utilizado como interface de visualização da informação inserida em base de dados. Recorrendo a comandos de linguagem PHP, esta informação pode ser filtrada e visualizada sob forma de tabelas.

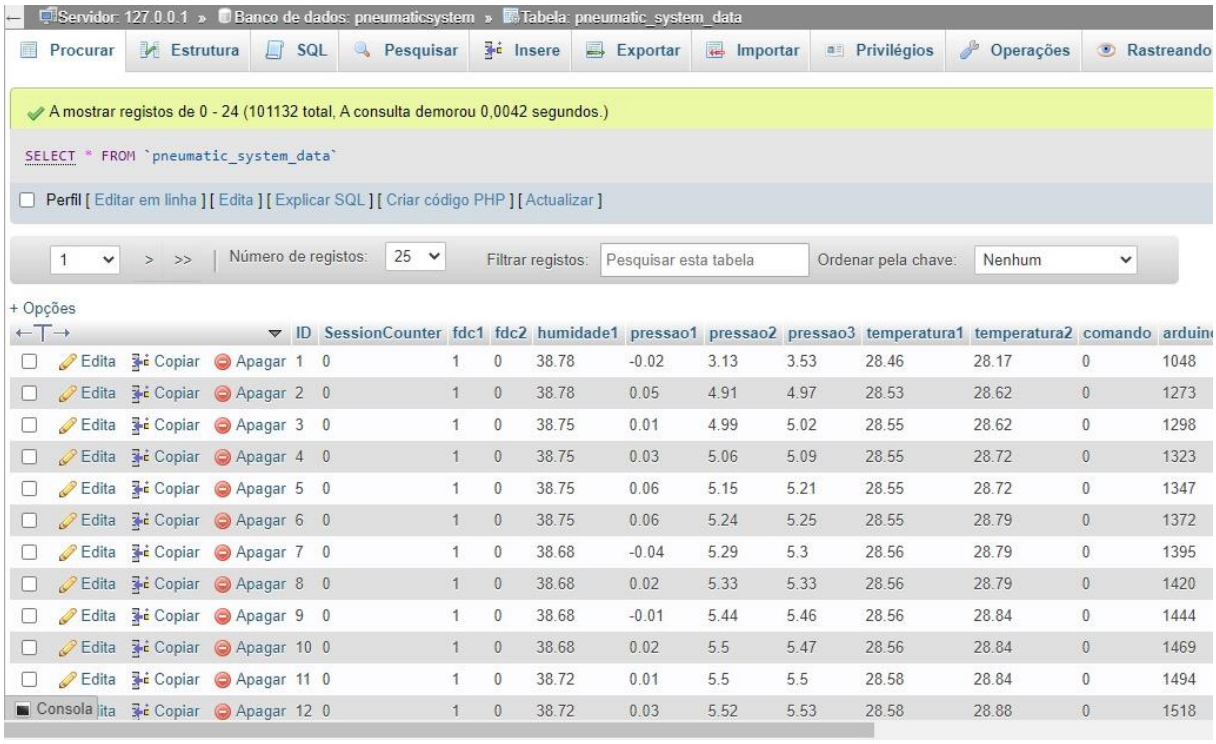


Figura 37 - phpMyAdmin como interface de visualização da informação

5.2 Interface de controlo e monitorização

Tendo em conta o principal objetivo desta Dissertação, desenvolvimento de uma solução que possibilite o controlo e monitorização de um sistema pneumático com registo da informação em base de dados, é necessário dispor de uma ferramenta que permita enviar ordens de comando para o microcontrolador e disponibilizar a informação recebida para o utilizador. Para esse efeito, foi desenvolvida uma interface que permite controlar e monitorizar os parâmetros do sistema pneumático desejados, utilizando comandos de HTML, CSS, PHP e JavaScript. Esta é bastante intuitiva e pode ser acedida por qualquer PC ou dispositivo móvel, *tablet* ou *smartphone*, ligado à rede local, sendo apenas necessário um *browser* para aceder ao endereço específico da página desenvolvida.

Na Figura 38 está representada a *homepage* da interface, na qual pode ser feita a escolha da operação a efetuar, selecionando um de dois botões: *Control interface*, para a interface de controlo, e *Monitoring interface*, para a interface de monitorização.

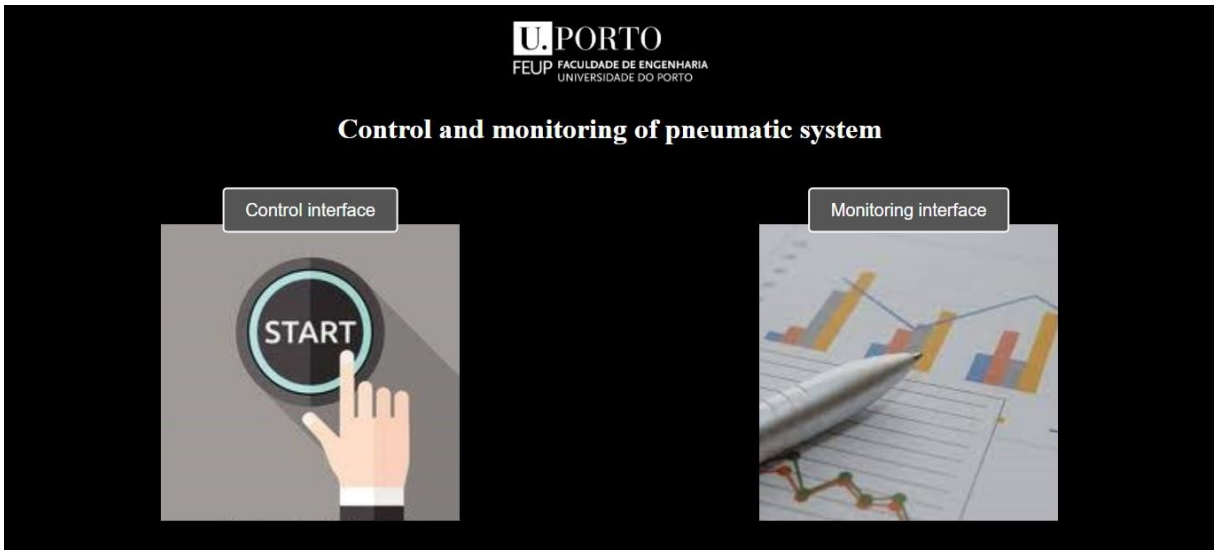


Figura 38 - *Homepage* da interface de controlo e monitorização

Caso a opção escolhida seja *Control interface* é carregada a página principal da interface de controlo (Figura 39), onde é possivel selecionar a opção da configuração do sistema pneumático que estiver implementada na bancada de teste: *Hardware configuration 1*, se a configuração do sistema pneumático implementada for a nº1, e *Hardware configuration 2*, se a configuração do sistema pneumático implementada for a nº2.

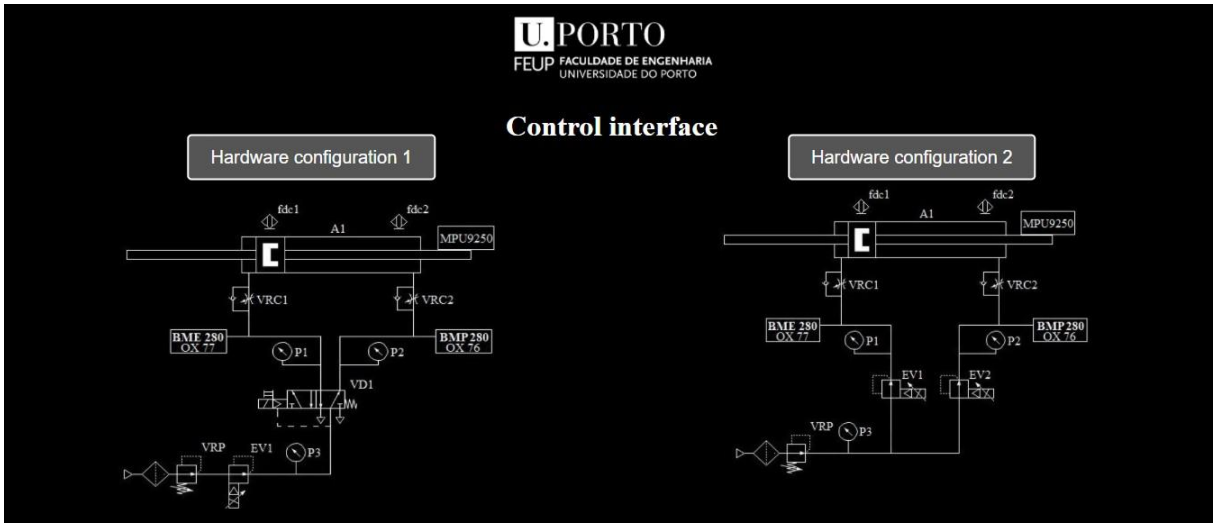


Figura 39 - Página principal da interface de controlo

Na Figura 40 e na Figura 41 são apresentadas as interfaces de controlo para as configurações do sistema pneumático nº1 e nº2, respetivamente. Nestas interfaces são definidos os parâmetros já mencionados na descrição da solução de controlo.

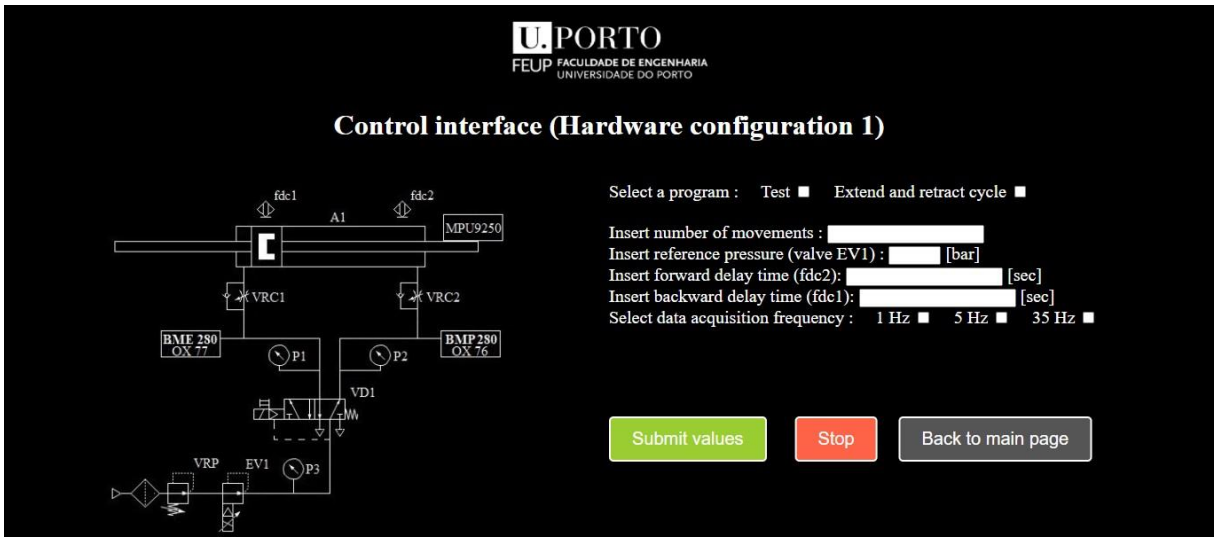


Figura 40 - Interface de controlo da configuração "sistema pneumático nº1"

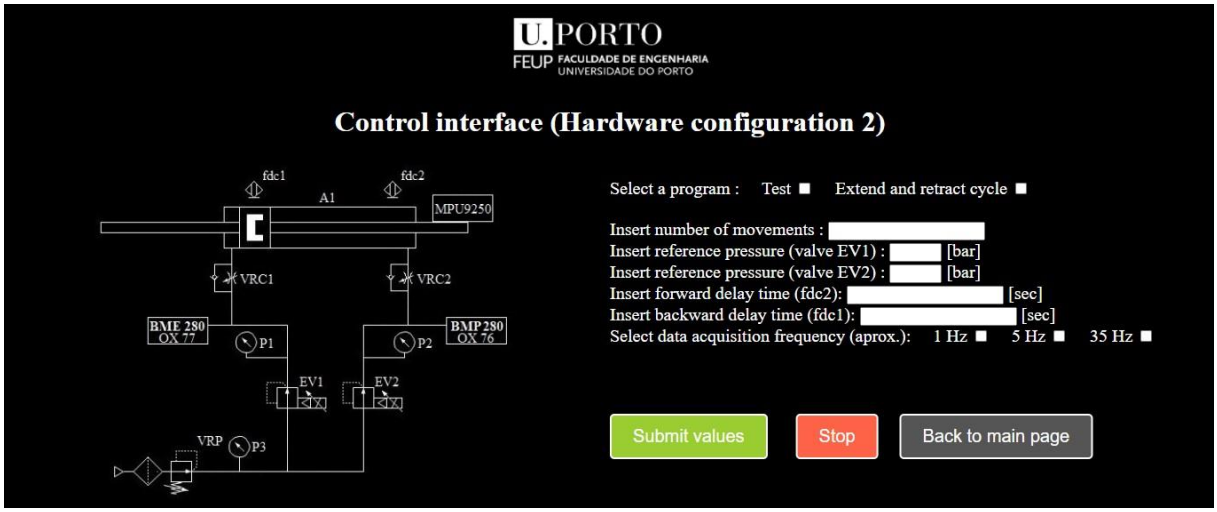


Figura 41 - Interface de controlo da configuração "sistema pneumático nº2"

Caso na *Homepage* (Figura 38) seja escolhida a opção *Monitoring interface*, é carregada a página principal da interface de monitorização (Figura 42) onde é possivel aceder à informação, armazenada em base de dados, pretendida. A seleção de cada botão conduz a uma nova página onde são disponibilizados, sob forma de tabela, os registos dos seguintes parâmetros :

- *Full data* - são exibidos todos os registos dos parâmetros monitorizados no sistema pneumático;
- *Pressure data* - são exibidos os valores lidos pelos três sensores de pressão;
- *Temperature and Humidity data* - são exibidos os valores de temperatura e humidade lidos pelos sensores BME280 e BMP280;
- *Accelerometer and Gyroscope data* - são exibidos os valores das componentes nas três direções (x, y e z) dos vetores aceleração e velocidade angular;
- *Pressure and Temperature data* - são exibidos os valores lidos pelos três sensores de pressão e os valores de temperatura e humidade lidos pelos sensores BME280 e BMP280;
- *Data from last 3 hours* - são exibidos todos os registos efetuados nas últimas três horas, tendo em conta o momento da consulta.

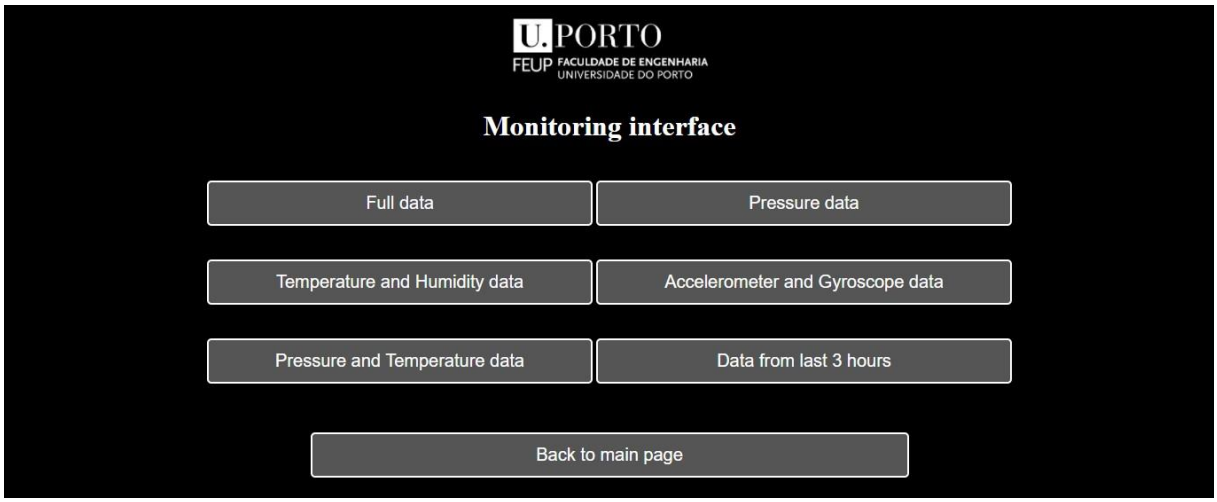
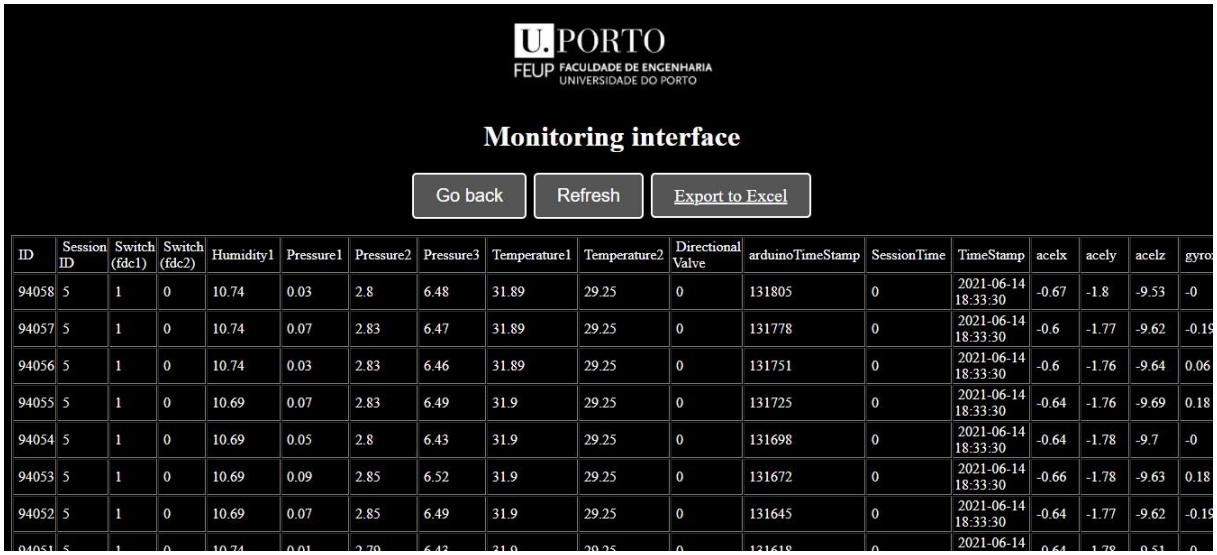


Figura 42 - Página principal da interface de monitorização

A Figura 43 é um exemplo de uma das páginas que disponibiliza a informação para o(s) utilizador(es), onde é, também, possível exportar um ficheiro num formato compatível com Excel, que contém toda a informação exibida. Este ficheiro pode ser utilizado para manipular a informação ou para criar gráficos que exponham a informação de uma forma mais *user friendly*.



ID	Session ID	Switch (fdc1)	Switch (fdc2)	Humidity1	Pressure1	Pressure2	Pressure3	Temperature1	Temperature2	Directional Valve	arduinoTimeStamp	SessionTime	TimeStamp	acelx	acely	acelz	gyro
94058	5	1	0	10.74	0.03	2.8	6.48	31.89	29.25	0	131805	0	2021-06-14 18:33:30	-0.67	-1.8	-9.53	-0
94057	5	1	0	10.74	0.07	2.83	6.47	31.89	29.25	0	131778	0	2021-06-14 18:33:30	-0.6	-1.77	-9.62	-0.19
94056	5	1	0	10.74	0.03	2.83	6.46	31.89	29.25	0	131751	0	2021-06-14 18:33:30	-0.6	-1.76	-9.64	0.06
94055	5	1	0	10.69	0.07	2.83	6.49	31.9	29.25	0	131725	0	2021-06-14 18:33:30	-0.64	-1.76	-9.69	0.18
94054	5	1	0	10.69	0.05	2.8	6.43	31.9	29.25	0	131698	0	2021-06-14 18:33:30	-0.64	-1.78	-9.7	-0
94053	5	1	0	10.69	0.09	2.85	6.52	31.9	29.25	0	131672	0	2021-06-14 18:33:30	-0.66	-1.78	-9.63	0.18
94052	5	1	0	10.69	0.07	2.85	6.49	31.9	29.25	0	131645	0	2021-06-14 18:33:30	-0.64	-1.77	-9.62	-0.19
94051	5	1	0	10.74	0.01	2.79	6.43	31.9	29.25	0	131618	0	2021-06-14	-0.64	-1.78	-9.53	-0

Figura 43 - Exemplo de uma página onde pode ser visualizada e exportada a informação

5.3 Síntese

Nesta secção é apresentada, inicialmente, a arquitetura da rede local utilizada, para o controlo e monitorização do sistema pneumático disponível na bancada de teste, e o *software* utilizado para criar um servidor *web* e uma base de dados, onde é registada e armazenada toda a informação recolhida do sistema pneumático.

Em seguida, é exposta a forma como foram criadas a base de dados, *pneumaticsystem*, e a tabela, *pneumatic_system_data*, utilizando o phpMyAdmin.

Por fim, é descrita a interface, *Control and monitoring of pneumatic system*, desenvolvida nesta Dissertação.

6 Ensaios realizados e resultados

Tendo sido desenvolvida a interface, que permite efetuar o controlo e monitorização do sistema pneumático com registo da informação em base de dados, procedeu-se à realização de diversos ensaios, para diferentes condições de trabalho, com o intuito de se poder fazer uma análise comportamental do sistema para cada uma das configurações do sistema pneumático implementada.

Desta forma, existem algumas denominações usadas ao longo da descrição dos ensaios e na análise aos resultados obtidos, que precisam ser clarificadas:

- Sessão - desde que o microcontrolador recebe os parâmetros enviados utilizando a interface, decorrem dois segundos até que seja iniciada a sequência de movimentos, e quando esta sequência termina decorrem mais dois segundos até ao fim da sessão. Assim sendo, a duração de uma sessão é definida pela soma dos quatro segundos com o tempo que demora a ser efetuada a sequência de movimentos. Na Figura 44, são apresentados os gráficos do estado dos sensores de proximidade, fdc1 e fdc2, e da posição do atuador. Para a sessão com temporizações, foi definida a execução de dois movimentos (um avanço e um recuo) e temporização de dois segundos tanto no avanço, como no recuo. Para a sessão sem temporizações foi definida a execução de dois movimentos (um avanço e um recuo);

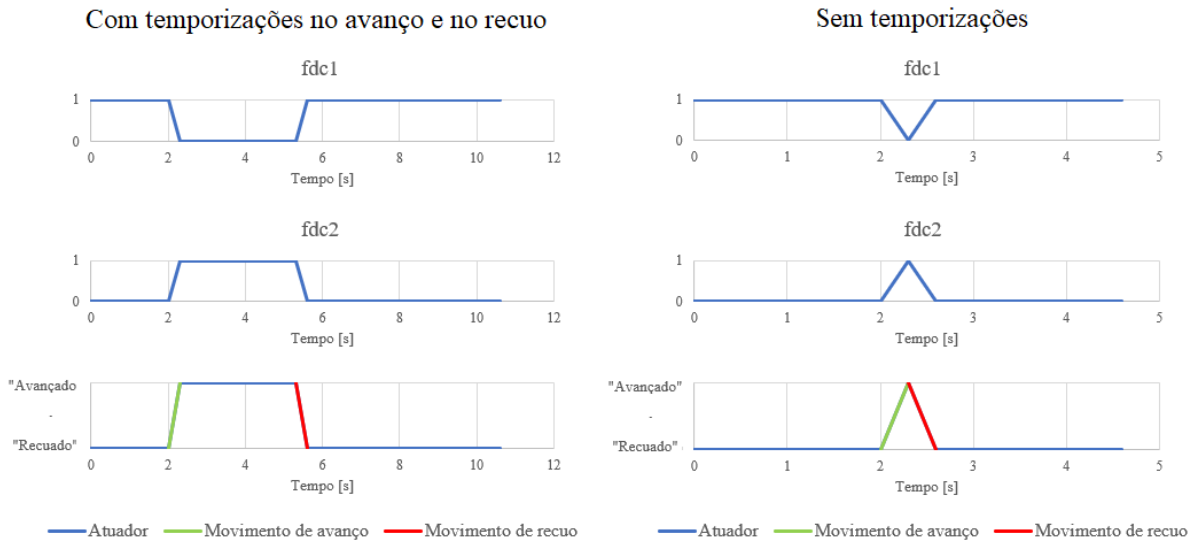


Figura 44 - Exemplos de sessões com e sem temporizações

- Movimento de avanço - designação utilizada para o deslocamento do êmbolo magnético de fdc1 para fdc2;
- Atuador na posição “avançado” - designação utilizada para a posição em que o atuador se encontra quando o sensor de proximidade fdc2 está atuado;

- Movimento de recuo - designação utilizada para o deslocamento do êmbolo magnético de fdc2 para fdc1;
- Atuador na posição "recuado" - designação utilizada para a posição em que o atuador se encontra quando o sensor de proximidade fdc1 está atuado;
- Temporização no avanço - designação utilizada para o tempo que o atuador permanece na posição "avançado", até iniciar o movimento de recuo. Este tempo pode ser definido na interface de controlo e o seu valor por defeito é de 0 segundos;
- Temporização no recuo - designação utilizada para o tempo que o atuador permanece na posição "recuado", até iniciar o movimento de avanço. Este tempo pode ser definido na interface de controlo e o seu valor por defeito é de 0 segundos;
- Câmara 1 - câmara na qual a pressão é medida utilizando o sensor de pressão P1;
- Câmara 2 - câmara na qual a pressão é medida utilizando o sensor de pressão P2.

6.1 Influência da pressão no tempo da sessão

O primeiro teste realizado teve por objetivo verificar a influência do valor da pressão de trabalho no tempo de uma sessão. Assim, foram realizadas, para cada uma das configurações de sistema pneumático, cinco ensaios (2, 3, 4, 5 e 6 bar), onde foram efetuados cinquenta movimentos sem temporizações, com uma frequência de aquisição e registo em base de dados de 35 Hz. Os tempos obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos nos ensaios de verificação da influência da pressão de trabalho no tempo de sessão

	Pressão de trabalho definida em EV1 [bar]	**Pressão de trabalho definida em EV2 [bar]**	**Tempo da sessão [s]**
Configuração "sistema pneumático nº1"	2	-----	21,7
	3	-----	20,2
	4	-----	19,8
	5	-----	19,3
	6	-----	19,2
Configuração "sistema pneumático nº2"	2	2	27,6
	3	3	26,7
	4	4	24,8
	5	5	23,7
	6	6	23,4

Pela análise dos resultados obtidos, é possível concluir que quando é utilizada uma pressão de trabalho superior, o tempo da sessão é inferior em ambas as configurações do sistema pneumático. Sendo que, entre os valores mínimo e máximo de pressão de trabalho são verificadas reduções do tempo da sessão de 11,5%, na configuração "sistema pneumático nº1", e de 15,2%, na configuração "sistema pneumático nº2". Tendo em consideração que o tempo de cada sessão inclui quatro segundos em que não há movimento (dois segundos antes do início da sequência de movimentos, e dois segundos no final da mesma), as reduções no

tempo efetivo de movimento do atuador são ainda maiores: 14,1% na configuração "sistema pneumático nº1", e de 17,8%, na configuração "sistema pneumático nº2". Estes valores, de maior tempo de ciclo, podem ser justificados pelas pressões mais baixas, sendo o atrito mais significativo nestas condições o que limita a velocidade nos movimentos de avanço e de recuo.

Outro aspeto que, também, pode ser constatado é a diferença que existe, para os mesmos valores de pressão de trabalho, entre as duas configurações do sistema pneumático, uma vez que os valores obtidos para a configuração "sistema pneumático nº2" são, para todos os casos, superiores aos valores obtidos para a configuração "sistema pneumático nº1". Esta diferença, justifica-se pela forma como é efetuado o comando do atuador pneumático, pois, no caso da configuração "sistema pneumático nº2", o uso das duas electroválvulas EV1 e EV2 faz com que os movimentos de avanço e de recuo sejam mais lentos, uma vez que o seu tempo de comutação, é superior ao tempo de comutação da electroválvula direcional 5/2, na configuração "sistema pneumático nº1".

6.2 Evolução da pressão nas câmaras do atuador pneumático

Com o objetivo de analisar eventuais diferenças na forma em como a pressão varia nas câmaras do atuador, nas duas configurações do sistema pneumático, para as mesmas pressões de trabalho, foram realizados os seguintes ensaios:

- 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", para as pressões de trabalho de 2, 3, 4, 5 e 6 bar;
- 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo, utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", para as pressões de trabalho de 2, 3, 4, 5 e 6 bar;
- 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração "sistema pneumático nº2", para as pressões de trabalho de 2, 3, 4, 5 e 6 bar;
- 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo, utilizando a configuração "sistema pneumático nº2", para as pressões de trabalho de 2, 3, 4, 5 e 6 bar.

Todos estes ensaios foram efetuados com uma frequência e registo de 35 Hz, e os resultados obtidos, estão disponíveis para consulta no Anexo B.

Na Figura 45, é possível observar a evolução das pressões nas câmaras do atuador pneumático, o estado do sensor de proximidade (fdc1) e do estado da electroválvula VD1, nos cinco segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", para pressão de trabalho de 5 bar. Pela análise do gráfico que mostra a evolução das pressões do sistema, é possível verificar que sempre que se dá a despressurização de uma das câmaras existe uma ligeira queda da pressão na linha de alimentação, seguida de um aumento. Esta queda deve-se ao facto de no momento da despressurização e consequente comutação da electroválvula, haver, momentaneamente, ligação ao escape decorrente do próprio funcionamento da electroválvula, que possui uma comutação assistida pneumaticamente. As pressões nas câmaras têm comportamentos semelhantes, em fases complementares do ciclo. No movimento de avanço, o valor da pressão na câmara 1 aumenta de forma repentina e decai ligeiramente, até que há um novo aumento até à pressão de trabalho definida. Este fenómeno ocorre devido à força necessária para começar a mover o êmbolo, que faz com que haja uma variação brusca do volume da câmara e consequente queda de pressão. Na câmara 2 a pressão caí bruscamente até que, no momento correspondente ao decaimento da pressão na câmara 1, a queda é um pouco mais lenta, criando até uma espécie de "patamar", e decaí novamente, ao mesmo tempo que a pressão na

câmara 1 aumenta. No movimento de recuo, as câmaras 1 e 2 invertem os papéis. Este comportamento repete-se ao longo de toda a sessão.

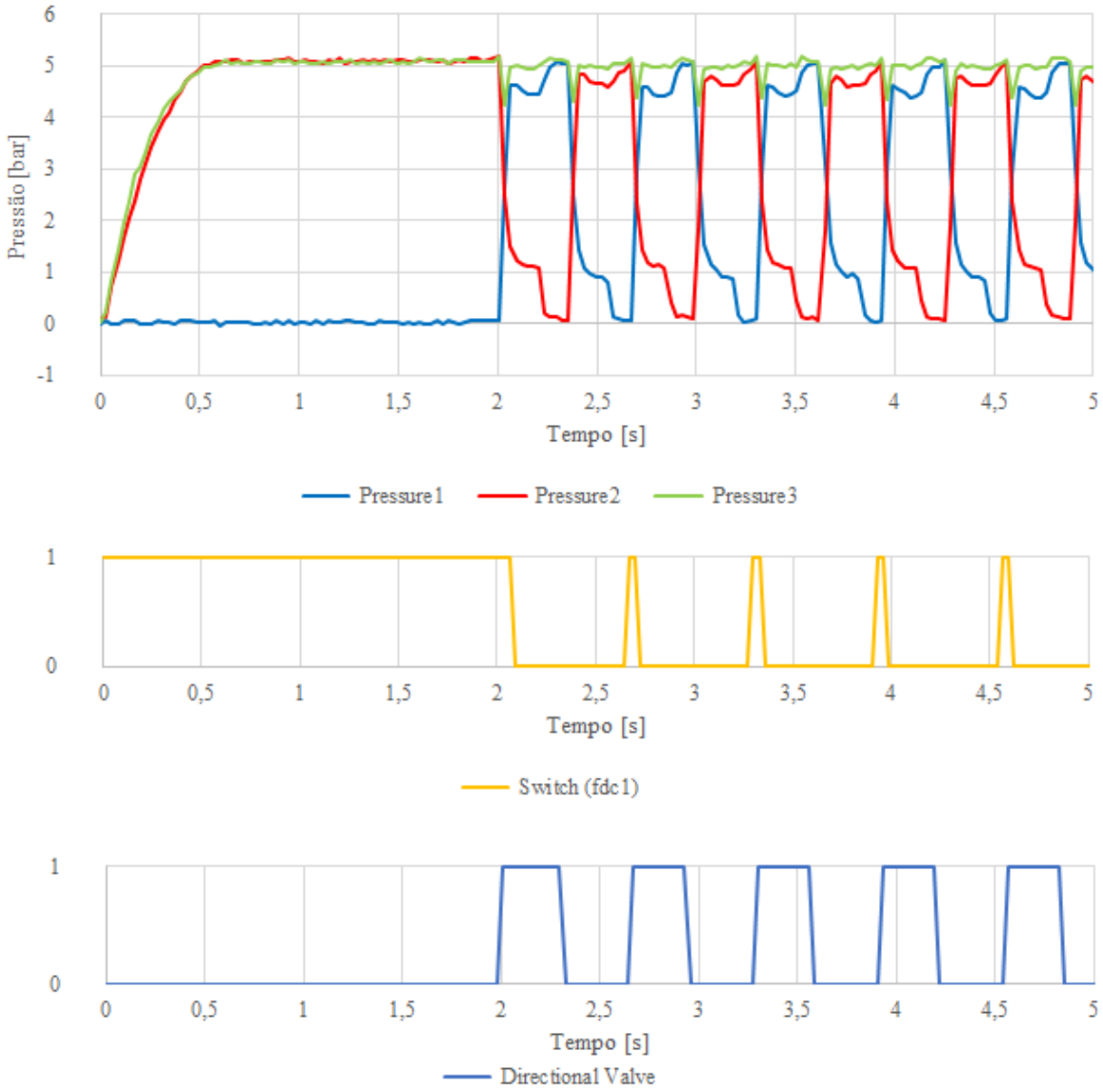


Figura 45 - Cinco segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", para pressão de trabalho de 5 bar

Na Figura 46, os perfis de pressões, são em tudo idênticos à situação anterior, com a exceção do momento em que os sensores de proximidade são atuados, uma vez que, quando o êmbolo aciona um sensor de proximidade, o atuador fica imobilizado, durante os cinco segundos pré-definidos, e aí dá-se a estabilização do valor da pressão.

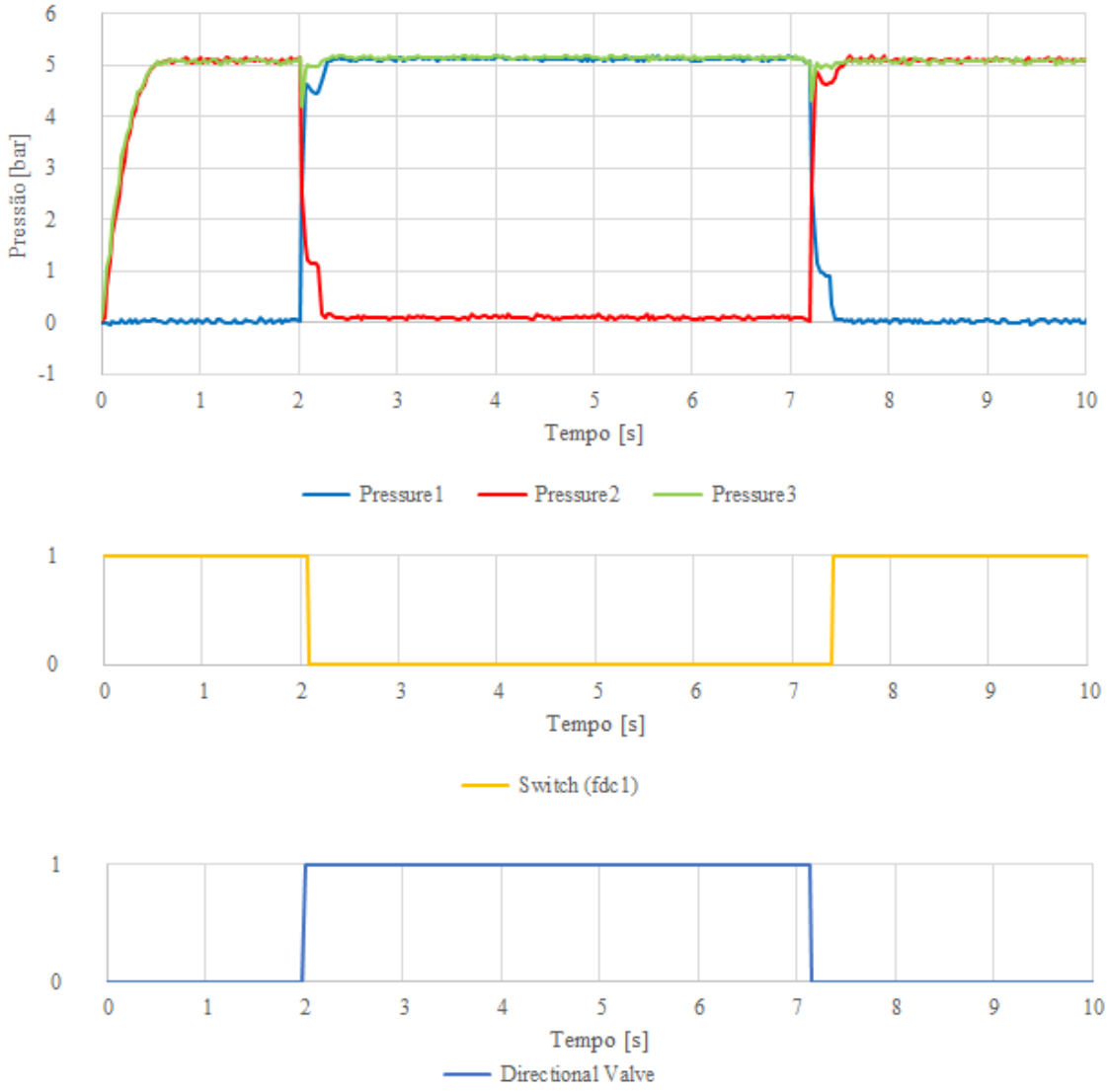


Figura 46 - Dez segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo, utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", para pressão de trabalho de 5 bar

Nos ensaios em que é utilizada a configuração "sistema pneumático nº2", a evolução da pressão tem um perfil completamente distinto relativamente aos resultados obtidos anteriormente, para a configuração "sistema pneumático nº1", como pode ser observado na Figura 47. Apesar de, na despressurização, tanto da câmara 1, como da câmara 2, continuar a haver um momento em que a queda da pressão é mais lenta, seguida de nova queda brusca, a pressurização é feita de uma forma mais progressiva. Outro aspeto que é notório, é o facto de, durante a sequência de movimentos, não ser atingida a pressão de trabalho de 5 bar, uma vez que o tempo de comutação da electroválvula reguladora de pressão é superior ao tempo que o atuador precisa para se deslocar, ou seja, quando um dos sensores de proximidade é atuado, à saída da electroválvula a pressão deveria ser de 5 bar, porém o valor de pressão que se obtém é ligeiramente mais baixo. Este fenómeno só foi detetado para as pressões de 5 e 6 bar.

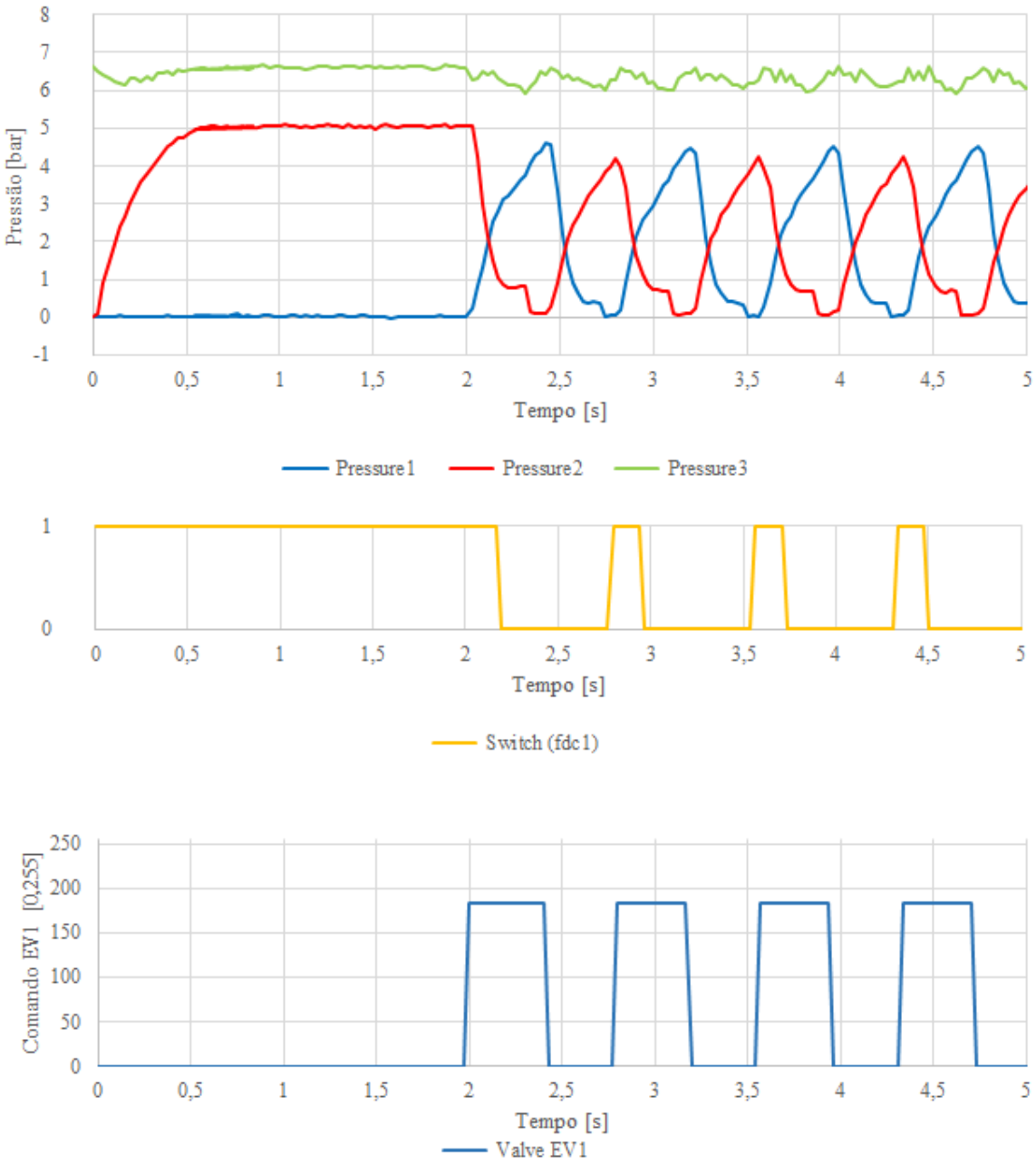


Figura 47 - Cinco segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações, utilizando a configuração "sistema pneumático nº2", para pressão de trabalho de 5 bar

Na Figura 48, é visível que o valor da pressão na câmara só atinge o valor da pressão de trabalho algum tempo após o fim de curso ser atuado. Assim que o sensor de proximidade é atuado, o atuador fica imobilizado durante os cinco segundos, pré-definidos para este teste, e é nesse intervalo de tempo que a pressão estabiliza nos 5 bar, como era esperado.

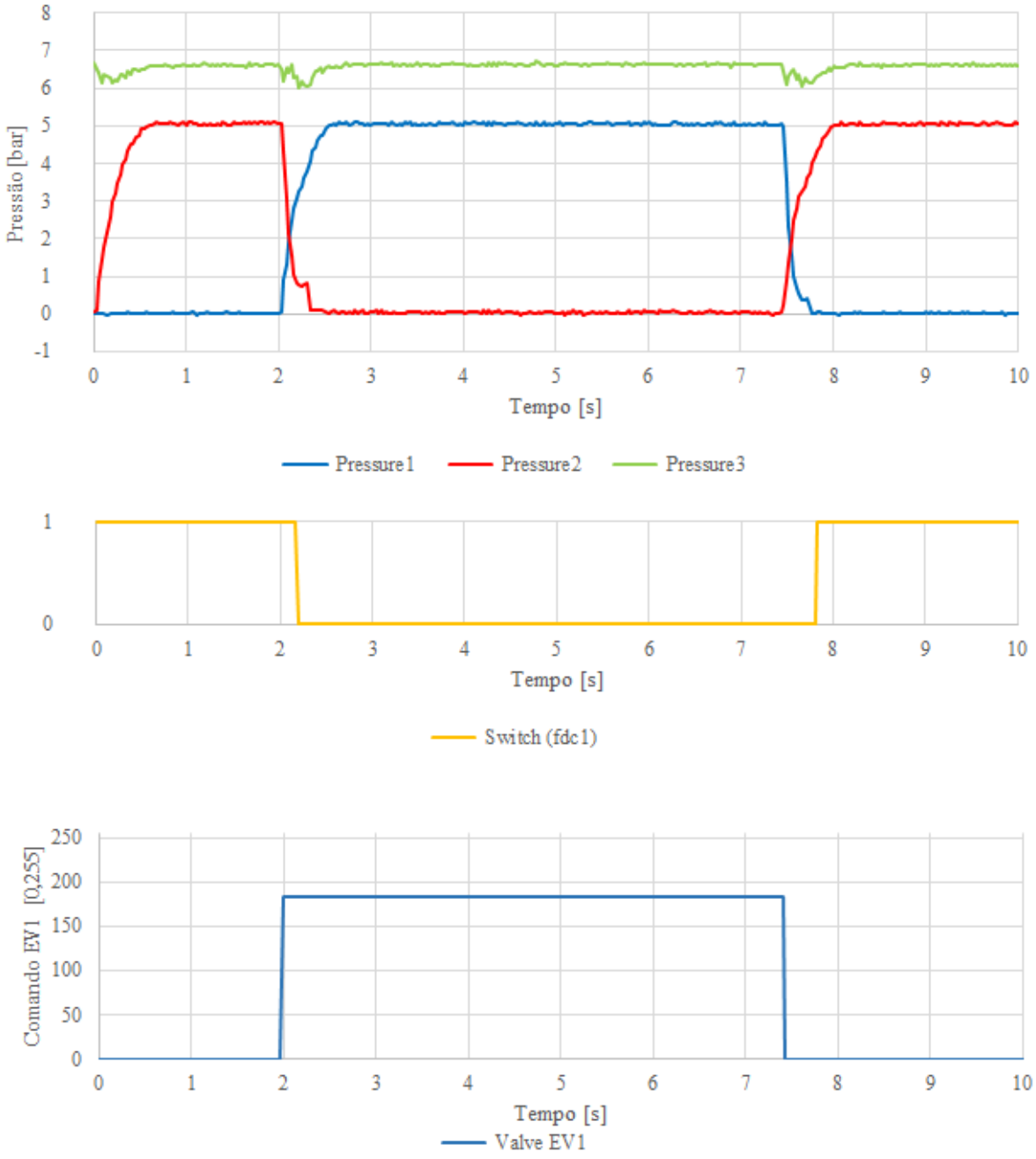


Figura 48 - Dez segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo, utilizando a configuração "sistema pneumático nº2", para pressão de trabalho de 5 bar

Dada a possibilidade de se poder definir a frequência de aquisição e registo na interface, é importante referir que neste tipo de ensaios deve ser escolhida a frequência mais elevada, caso contrário, há uma "perda" de informação devido ao menor número de medições efetuadas no mesmo intervalo de tempo. A título de exemplo, são apresentados na Figura 49 os gráficos dos primeiros 10 segundos de um teste com temporização entre movimentos de 5 segundos e pressão de trabalho de 5 bar com frequências de aquisição e registo distintas (5 e 35 Hz).

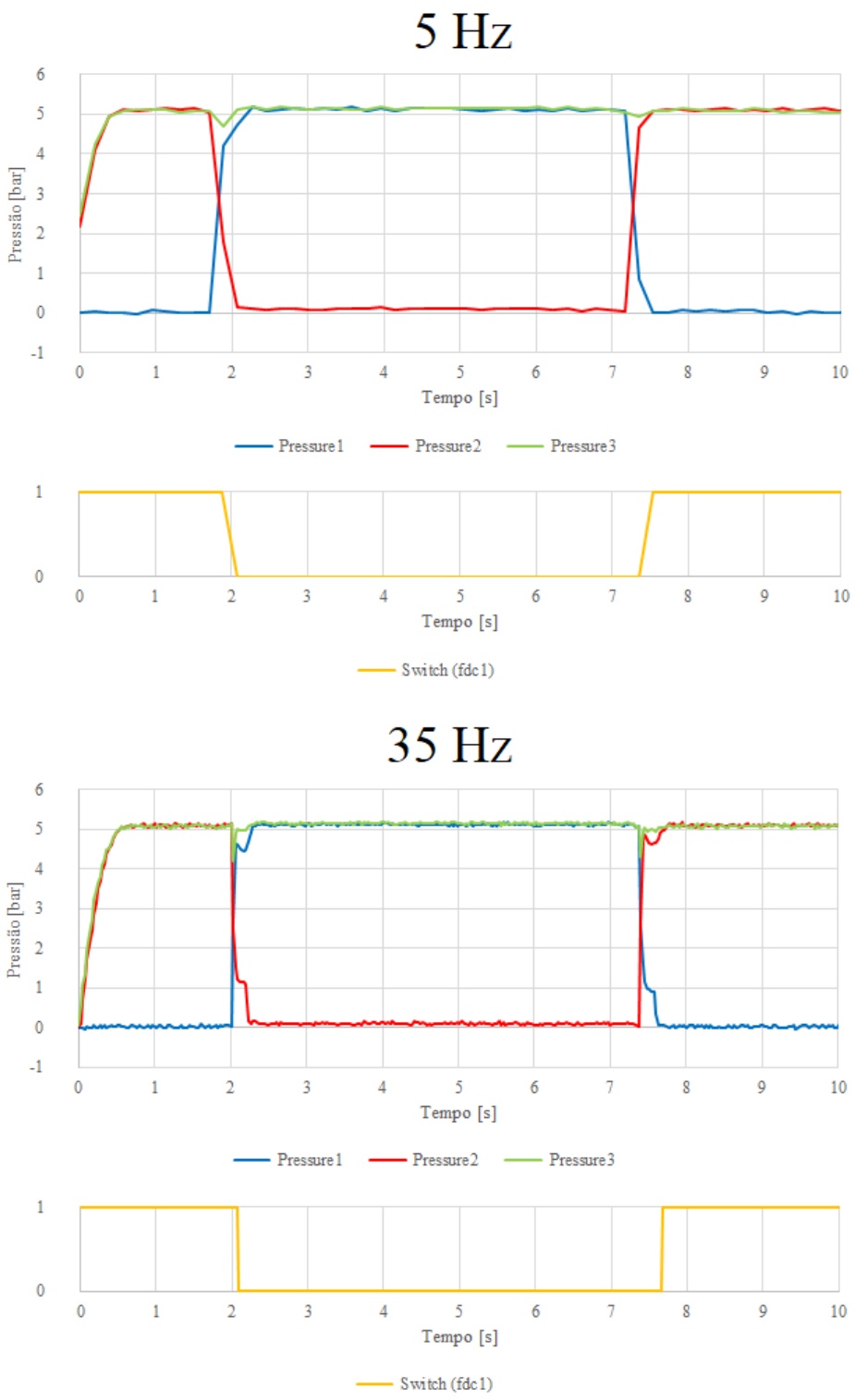


Figura 49 - Comparação entre os resultados obtido no mesmo teste com diferentes frequências de aquisição e registo, 5 Hz e 35 Hz

Pela análise da Figura 49, verifica-se que os momentos em que existe pressurização e despressurização das câmaras do atuador pneumático, são aqueles em que a diferença é mais notória, devido ao facto de tanto a pressurização, como a despressurização serem demasiado rápidas. Pelo que, utilizando uma frequência de aquisição e registo baixa (5 Hz) deixa de ser possível visualizar a ligeira queda da pressão logo após o rápido aumento, no momento da pressurização, e o "patamar" onde a queda da pressão é mais lenta, no momento da despressurização.

6.3 Evolução da temperatura e humidade relativa

Por forma a verificar a evolução tanto da temperatura, como da humidade relativa do ar nas câmaras do atuador pneumático, ajustou-se manualmente a pressão na válvula VRP para o valor de 6,5 bar e foram realizados os seguintes ensaios:

- 10 movimentos com temporizações, de um minuto, no avanço e no recuo, utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", para as pressões de trabalho de 2, 4 e 6 bar;
- 10 movimentos com temporizações, de um minuto, no avanço e no recuo, utilizando a configuração "sistema pneumático nº2", para as pressões de trabalho de 2, 4 e 6 bar.

Como referido anteriormente na secção 3.3, o tempo de resposta dos sensores de temperatura e humidade é de um segundo, pelo que não faria qualquer sentido utilizar uma frequência de aquisição e registo "alta" neste tipo de ensaios. Então, foi definida na interface a frequência de 1 Hz.

É de salientar, que os resultados obtidos poderão estar condicionados, pelo facto de os sensores utlizados serem fabricados para medição de valores à pressão atmosférica, o que não acontece no sistema utilizado.

Nesta secção são analisados e devidamente apresentados os resultados obtidos para os ensaios efetuados com pressão de trabalho de 6 bar, os restantes estão disponibilizados no Anexo C.

Na Figura 50 e na Figura 51 são apresentados os perfis de temperatura do ar na câmara 1 obtidos para os ensaios realizados para ambas as configurações do sistema pneumático. Como pode ser verificado, ainda que haja uma ligeira diferença de valores, os perfis de temperatura do ar são idênticos para ambas as configurações do sistema pneumático, e num ciclo de movimentos têm a seguinte evolução: quando existe pressurização da câmara, a temperatura do ar aumenta rapidamente, sendo que, durante a paragem entre movimentos, onde se dá a estabilização da pressão na câmara, a temperatura decai lentamente, até que se dá a despressurização e a temperatura sofre uma queda repentina; quando a câmara se encontra despressurizada a temperatura aumenta de uma forma bastante lenta.

Classificações como decaí lentamente ou aumenta rapidamente, são apenas relativas à visualização nos gráficos, uma vez que, em valor absoluto essas variações de temperatura do ar não são significativas.

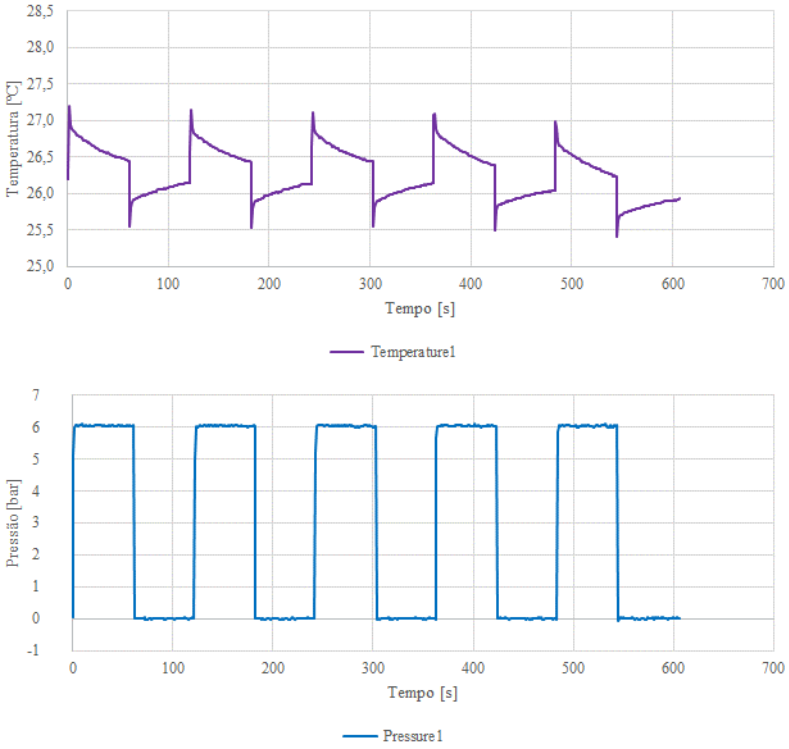


Figura 50 - Perfil de temperatura do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração "sistema pneumático nº1"

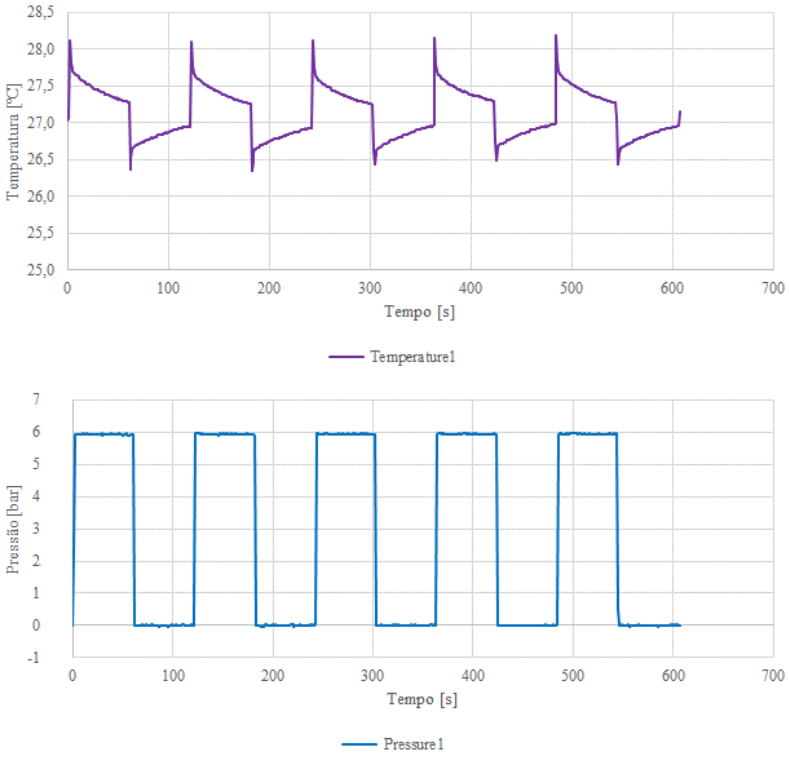


Figura 51 - Perfil de temperatura do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração "sistema pneumático nº2"

Ainda que os perfis de temperatura do ar na câmara 2 não sejam idênticos aos da temperatura do ar na câmara 1, o seu comportamento é semelhante, quando há pressurização existe um aumento da temperatura que, em seguida, decresce lentamente, e quando a câmara é despressurizada a temperatura cai repentinamente. Verificou-se ainda que a temperatura do ar

na câmara 2 é, em todos os ensaios efetuados, ligeiramente inferior à temperatura do ar na câmara 1, este fenómeno pode justificar-se pela utilização de sensores diferentes nas medições, ou pelo facto da tubagem de alimentação da câmara 2 ser um pouco mais extensa. Os perfis de temperatura do ar na câmara 2 estão representados na Figura 52 e na Figura 53.

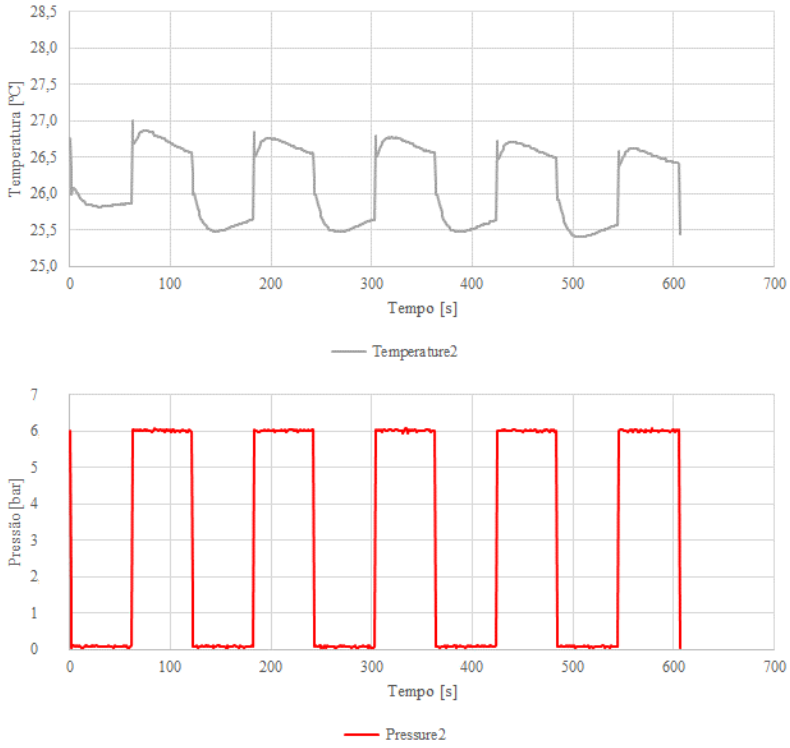


Figura 52 - Perfil de temperatura do ar na câmara 2 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração "sistema pneumático nº1"

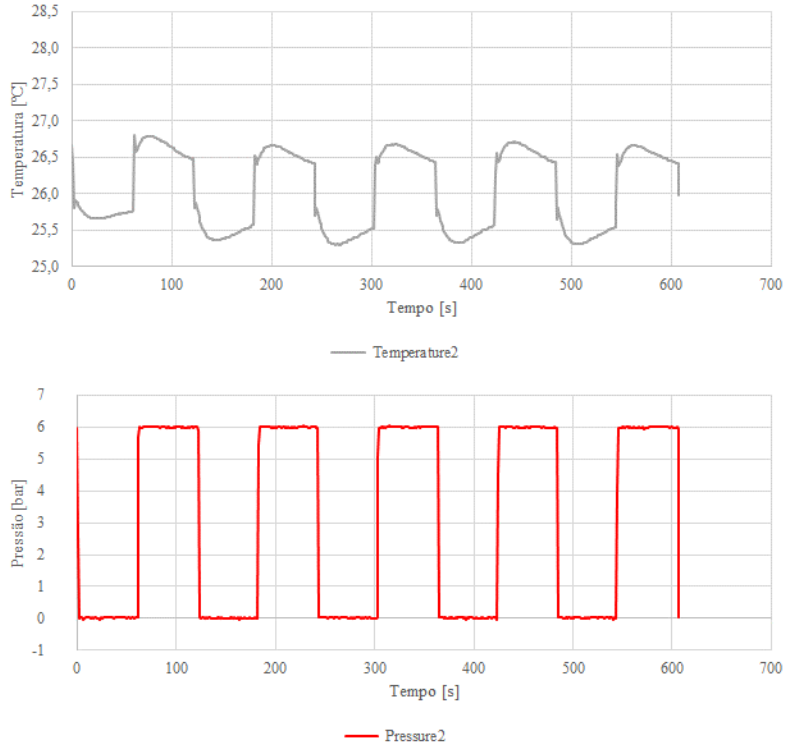


Figura 53 - Perfil de temperatura do ar na câmara 2 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração "sistema pneumático nº2"

No que diz respeito à humidade relativa do ar na câmara 1, é possível observar a sua evolução na Figura 54 e na Figura 55. No momento da pressurização, e consequente aumento da temperatura, a humidade relativa aumenta, contudo, enquanto a câmara se encontra pressurizada, o seu valor decresce numa fase inicial e, em seguida, cresce lentamente. No momento da despressurização da câmara, há uma queda do valor da humidade relativa, seguido de um aumento progressivo.

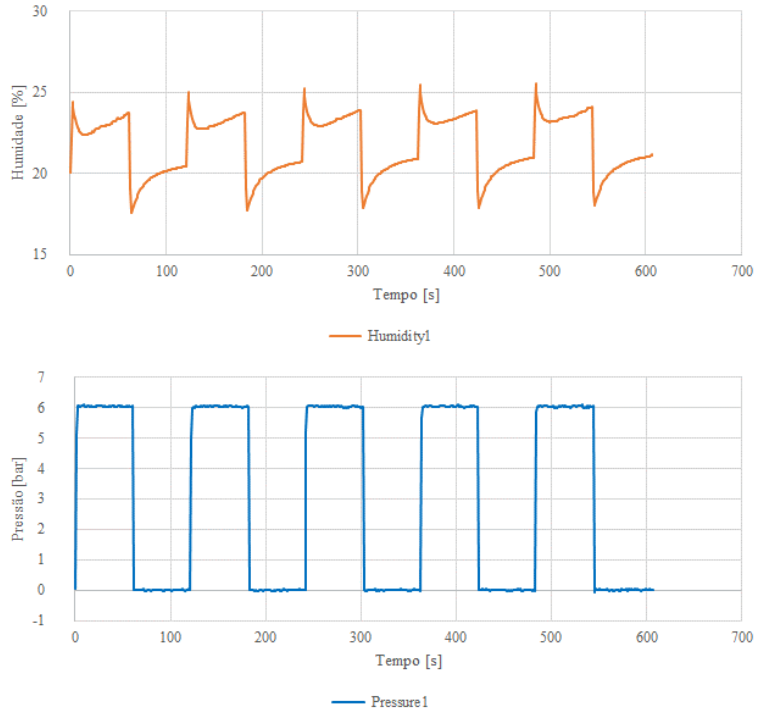


Figura 54 - Perfil de humidade relativa do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº1”

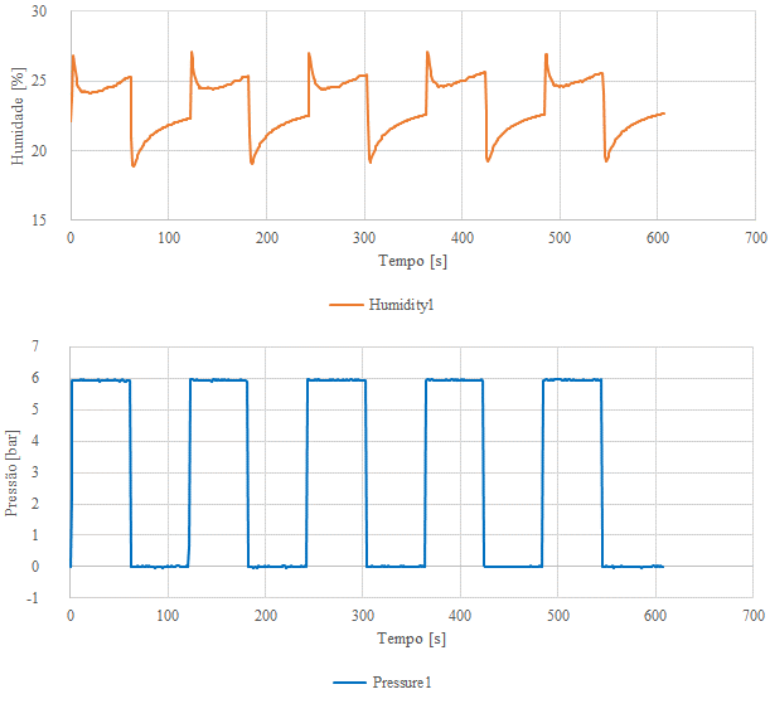


Figura 55 - Perfil de humidade relativa do ar na câmara 1 obtido para o teste realizado utilizando a pressão de trabalho de 6 bar e a configuração “sistema pneumático nº2”

Por comparação com os resultados obtidos para outros valores de pressão, é possível afirmar que quanto maior é a pressão de trabalho, maior será a variação da temperatura na pressurização e na despressurização.

6.4 Síntese

Neste capítulo, são apresentados todos os resultados dos ensaios efetuados, utilizando o sistema de controlo e monitorização desenvolvido e implementado nesta Dissertação.

Inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios cujo objetivo é avaliar a influência da pressão no tempo total da sessão, em ambas as configurações de sistema pneumático. Nestes ensaios, é possível verificar que para uma pressão de trabalho maior, o tempo de ciclo é inferior, como é esperado, uma vez que a força disponível é maior, e que utilizando a configuração "sistema pneumático nº1", o tempo da sessão é inferior comparativamente à configuração "sistema pneumático nº2", funcionando ambas à mesma pressão.

Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de pressão, onde são observadas e analisadas, as diferenças existentes entre os perfis de pressão obtidos para ambas as configurações do sistema pneumático. Estas diferenças, são verificadas nos momentos de pressurização e despressurização das câmaras do atuador.

Por fim, são apresentados os resultados dos ensaios de temperatura e humidade, nos quais se verifica uniformidade dos perfis, ainda que com gamas ligeiramente distintas. Outro aspeto verificado para ambas configurações do sistema pneumático, é que quanto maior a pressão, maior é a amplitude térmica na pressurização e despressurização das câmaras do atuador.

7 Conclusões e trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Esta Dissertação focou-se no desenvolvimento e implementação de uma solução com a qual fosse possível o controlo e monitorização de um dado sistema pneumático. Esta última é conseguida fazendo a aquisição e registo da informação relativa a esse mesmo sistema (pressão, estado de fins de curso, temperatura, aceleração, entre outros) em base de dados, com a possibilidade de acesso remoto, a partir da rede local. Para isso, foi desenvolvida uma solução baseada num microcontrolador ATmega2560, disponibilizado numa placa Arduino Mega 2560, sendo esta uma solução muito mais viável economicamente, quando comparada com um PLC.

Considera-se que o objetivo foi alcançado, uma vez que, com a interface desenvolvida e apresentada na secção 5.2, é possível controlar o número de movimentos, pressão, temporizações entre movimentos e frequência de aquisição e registo da informação (1, 5 ou 35 Hz), qualquer que seja a configuração do sistema pneumático ajustada manualmente, pelo utilizador.

No que diz respeito às duas configurações do sistema pneumático verificou-se que a configuração "sistema pneumático nº1" é, na ausência de carga, mais rápida do que a configuração "sistema pneumático nº2", para as mesmas condições de trabalho. Pelo que, tendo em consideração o custo que cada uma delas representa, se conclui que a utilização desta última apenas será relevante caso, num ciclo de movimentos vai/vem, sejam desejadas pressões de avanço e recuo diferentes, para efeitos de poupança energética, uma vez que, cada uma das electroválvulas reguladoras de pressão custa, sensivelmente, o dobro da electroválvula direcional 5/2.

Através dos ensaios realizados foi possível observar os perfis de pressão, temperatura e humidade relativa do ar, para diferentes condições de trabalho. Assim, verificou-se a ocorrência de alguns fenómenos, independentemente da configuração do sistema pneumático ajustada, tais como:

- A queda da pressão na linha de alimentação, quando alguma das câmaras do atuador pneumático é pressurizada, justificada pela ligação das electroválvulas ao escape, no momento da comutação;
- O aumento da temperatura e da humidade relativa do ar, quando existe um aumento da pressão na câmara do atuador pneumático, que é tanto maior quanto maior for a pressão de trabalho;
- A diminuição da temperatura e da humidade relativa do ar, quando existe uma queda da pressão na câmara do atuador pneumático, que é tanto maior quanto maior for a pressão de trabalho;
- A redução do tempo da sessão com o aumento da pressão de trabalho.

7.2 Trabalhos futuros

Ainda que esta Dissertação tenha sido desenvolvida dando seguimento a trabalhos anteriores, e tenham sido introduzidas novas funcionalidades, existem sempre outras modificações que podem ser feitas, tendo em vista a obtenção de um sistema mais flexível e com mais funcionalidades. Por exemplo:

- Adicionar na interface uma secção onde possa ser visualizado o estado dos componentes, e onde possam ser apresentadas mensagens de alerta caso seja necessário efetuar manutenção;
- Incorporar uma câmara de vídeo no sistema, e assim poder realizar e visualizar os ensaios remotamente;
- Substituir o atuador, de forma a verificar se os perfis de pressão, temperatura e humidade relativa do ar se mantêm, e se o sistema se comporta da mesma maneira;
- Introduzir novos sensores de proximidade situados entre os já existentes, e com o seu acionamento gerar uma contrapressão, criando assim um amortecimento do movimento do atuador;
- Realizar ensaios com carga no atuador, para avaliar a interferência da carga no tempo de ciclo, e por consequência no tempo da sessão;
- Avaliar a influência do aumento da pressão nas câmaras do atuador no tempo de vida útil do mesmo.

Referências

[1] Dutt, K. (2013), "Analytical description of pneumatic system", International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 4 (Issue 9), 1443-1453.

[2] Reljić, V., Šešlija, D., Milenković, I., Bajči, B., Dudić, S., e Šulc, J. (2019), "Concept of remotely controlled digital pneumatic system in accordance with Industry 4.0 approach", In 2019 5th Experiment International Conference (exp. at'19) (pp. 419-423), Funchal, Portugal: IEEE, doi: 10.1109/expat.2019.8876544.

[3] Schmalz, K. e Winter, A. (2016),"Trends in Vacuum Technology and Pneumatics in the Context of Digitalization" 10th International Fluid Power Conference, 83-102.

[4] Capela, B. (2018), "Sistema de Monitorização e Controlo para Atuador Pneumático", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, https://hdl.handle.net/10216/116062.

[5] Abreu, P., Chouzal, M. de Fátima, Valiente, J. S., Torre, L. De La, Restivo, M. T. (2019), "Remote experiments with pneumatic circuit using a double rod cylinder", In 2019 5th Experiment International Conference (exp.at'19)(pp. 410-414), Funchal, Portugal: IEEE, doi: 10.1109/EXPAT.2019.8876526.

[6] Lakeside (2021), "Aventics Smart Pneumatic Monitoring System", acedido em 3 de março de 2021, lakesidecontrols.com/digital-transformation/data-analytics/principle-driven-analytics/aventics-smart-pneumatic-monitoring-system/.

[7] Aventics (2017), "Advanced Valve System", acedido em 3 de março de 2021, https://www.aventics.com/media/AVENTICS_USA/Service/Documentation_downloads/Sales_Catalog/AVENTICS_AV-Valves_R499051029.pdf.

[8] EMERSON (2019), "Improve Machine Performance", acedido em 3 de março de 2021, https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-smart-pneumatics-aventics-en-6980724.pdf.

[9] BIMBA (2019), "IntelliSense® Predictive Intelligence for Pneumatics", acedido em 2 de março de 2021, https://djqq0xq3q4j4b.cloudfront.net/pdf/IntelliSense_Catalog.pdf.

[10] FESTO (s.d.), "Optimize Production with FESTO Diagnostics", acedido em 7 de março de 2021, https://www.FESTO.com/net/supportportal/files/10153/diag.

[11] FESTO (2020), "Motion Terminal VTEM", acedido em 8 de março de 2021, https://www.FESTO.com/media/pim/630/D15000100140630.PDF.

[12] Wahl, P., FESTO (2017), "White paper: Digital simplicity. New ways to increase productivity with "smart" systems", https://www.festoblog.com/pdf/white-paper/Digital_Simplicity_WP.pdf.

[13] FESTO (2020), “White paper: Automating on/off process valves. A comparison of actuation methods for pneumatic actuators”, https://festo.com/net/SupportPortal/Files/703032/Festo_Automating_Process_Valves_WhitePaper_EN142460_202005_V01.pdf.

[14] FESTO (2019), "Energy efficiency modules MSE6, MSE series", acedido em 7 de março de 2021, FESTO.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ENGB/PDF/EN/MSE6_EN.PDF.

[15] FESTO (2016), "Energy efficiency module MSE6-E2M", acedido em 8 de março de 2021, FESTO.com/net/SupportPortal/Files/427347/PSI_407_8_MSE6_E2M.pdf.

[16] FESTO (s.d.), "Energy efficiency module MSE6-E2M Description", acedido em 10 de março de 2021, https://www.FESTO.com/net/SupportPortal/Files/343688/MSE6-E2M_2014-04_8037121g1.pdf.

[17] FESTO (s.d.), "Embedded Controller with the CPX-FEC", acedido em 7 de março de 2021, https://www.FESTO.com/net/SupportPortal/Files/216362/CPX-FEC .

[18] FESTO (2021), "Motion apps - Your route to greater productivity", acedido em 8 de março de 2021, https://www.FESTO.com/vtem/nl/cms/motion-apps.htm.

[19] SMC Corporation (2021), "SMC your one-stop-shop for all your automation needs", acedido em 17 de março de 2021, https://www.smc.eu/en-eu/solutions/io-link.

[20] SMC Corporation (2021), "EX600, IO-Link Master Unit", acedido em 17 de março de 2021, https://www.smc.eu/pt-pt/produtos/ex600-io-link-master-unit~165320~cfg.

[21] SMC Corporation (2018), "EX600 Series IO-Link Master", acedido em 17 de março de 2021, static.smc.eu/binaries/content/assets/smc_global/solutions/io-ink/sp175x-032e- ex600.pdf.

[22] FESTO (2021), "Round cylinders DSNU", acedido em 25 de abril de 2021, https://www.FESTO.com/media/pim/155/D15000100122155.PDF.

[23] ASCO (2017), "SPOOL VALVES pilot operated or air operated, spool type single/dual solenoid or air aluminium body, 1/4-1/2", acedido em 14 maio de 2021, https://www.emerson.com/documents/automation/european-catalog-solenoid-valve-general-service-551-552-553-1-4-3-8-1-2-5-2-5-3-asco-en-6869174.pdf.

[24] SMC Corporation (2015), "Electro-Pneumatic Regulator/Electronic Vacuum Regulator Series ITV", acedido em 14 de maio de 2021, smcpneumatics.com/pdfs/ITV.pdf.

[25] SMC Corporation (s.d.), "Auto Switch Guide", acedido em 25 de abril de 2021, https://www.smcpneumatics.com/pdfs/AutoSw-Guide.pdf.

[26] SMC Corporation (s.d.), "2-Colour Display High Precision Digital Pressure Switch", acedido em 8 de maio de 2021, https://content2.smcetech.com/pdf/ZSE40A-ISE40A-A_EU.pdf.

[27] BOSCH (2020), "BME280 Combined humidity and pressure sensor", acedido em 8 de maio de 2021, bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf.

[28] BOSCH (2020), "BMP280 Digital Pressure Sensor", acedido em 8 de maio de 2021, https://bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp280-ds001.pdf.

[29] InvenSense (2016), "MPU-9250 Product Specification Revision 1.1", acedido em 13 de maio de 2021, https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU- 9250A-01-v1.1.pdf.

[30] Arduino.cc (2020), "ARDUINO MEGA PINOUT DIAGRAM", acedido em 16 de maio de 2021, https://content.arduino.cc/assets/Pinout-Mega2560rev3_latest.pdf.

[31] Arduino.cc (2021), “ARDUINO MEGA 2560 REV3”, acedido em 16 de maio de 2021, https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3.

[32] Atmel Corporation (2014), "Atmel ATmega640 / V-1280 / V-1281 / V-2560 / V-2561/V", acedido em 25 de maio de 2021, http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf.

[33] Arduino.cc (2021), “ARDUINO *ETHERNET SHIELD 2*”, acedido em 16 de maio de 2021, https://store.arduino.cc/arduino-ethernet-shield-2.

[34] WIZnet (2014), “W5500 Datasheet Version 1.0.6”, acedido em 20 de maio de 2021, http://wizwiki.net/wiki/lib/exe/fetch.php?media=products:w5500:w5500_ds_v106e_141230.pdf.

[35] Arduino.cc (2019), “SPI library”, acedido em 16 de maio de 2021, https://www.arduino.cc/en/reference/SPI.

[36] Arduino.cc (2021), “ARDUINO 4 RELAYS SHIELD”, acedido em 16 de maio de 2021, https://store.arduino.cc/arduino-4-relays-shield.

[37] Finder, “30 Series - Subminiature DIL relays 2 A”, acedido em 16 de maio de 2021, https://www.finder-relais.net/en/finder-relays-series-30.pdf.

ANEXO A: Esquema das ligações dos sensores e das válvulas ao Arduino Mega 2560

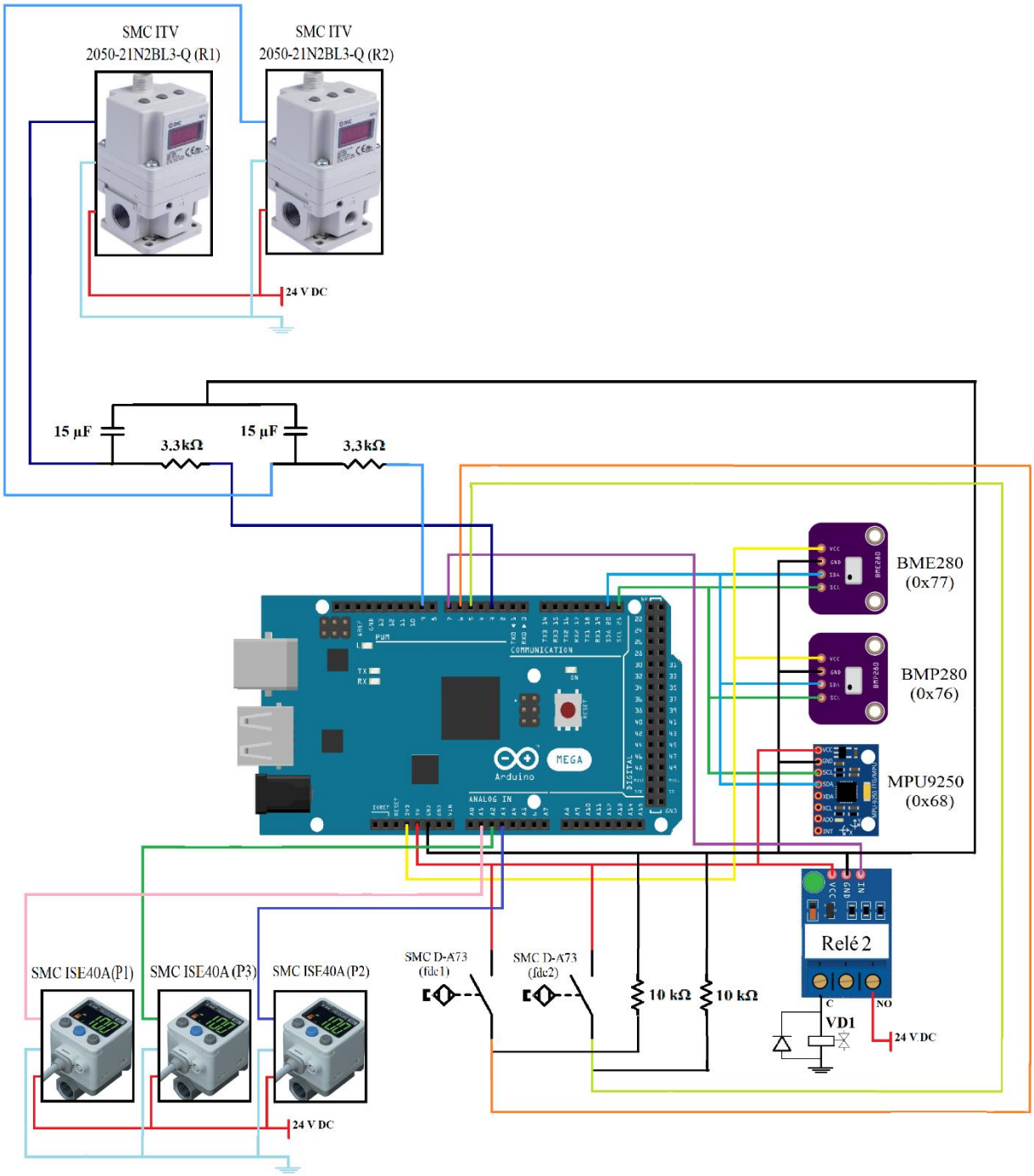


Figura A1 - Esquema das ligações dos sensores e válvulas Arduino Mega 2560

ANEXO B: Resultados dos ensaios de pressão

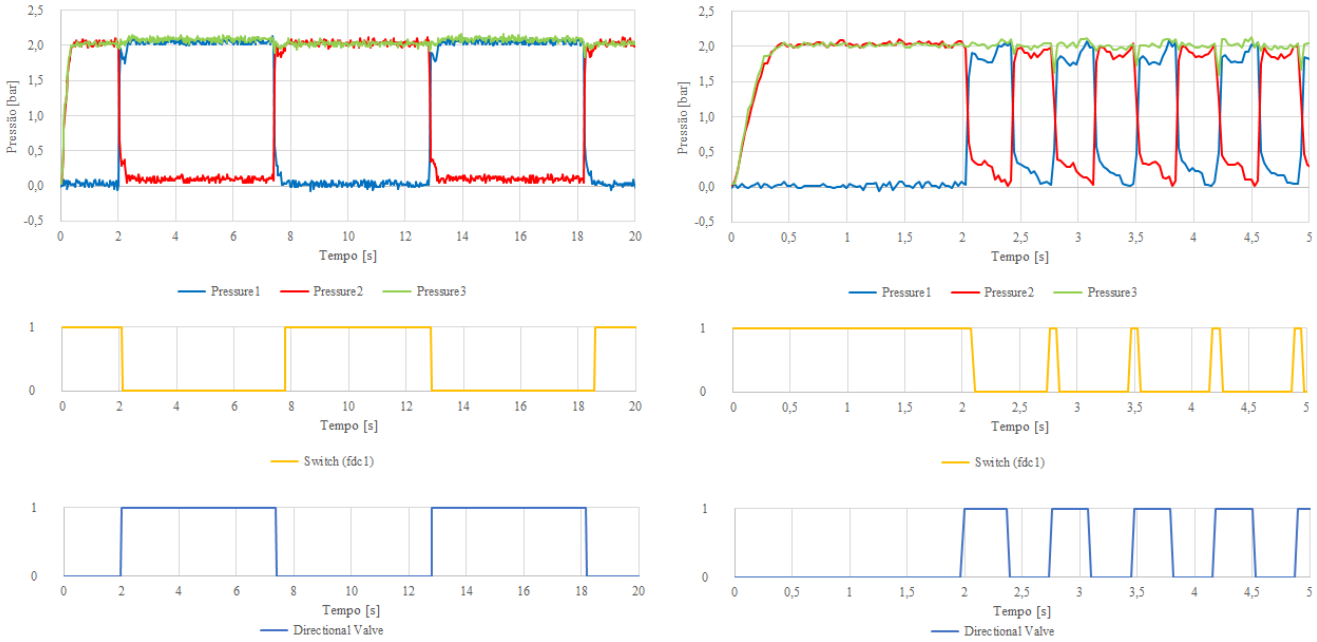


Figura B1 - Configuração “sistema pneumático nº1”: 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 2 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 2 bar (à direita)

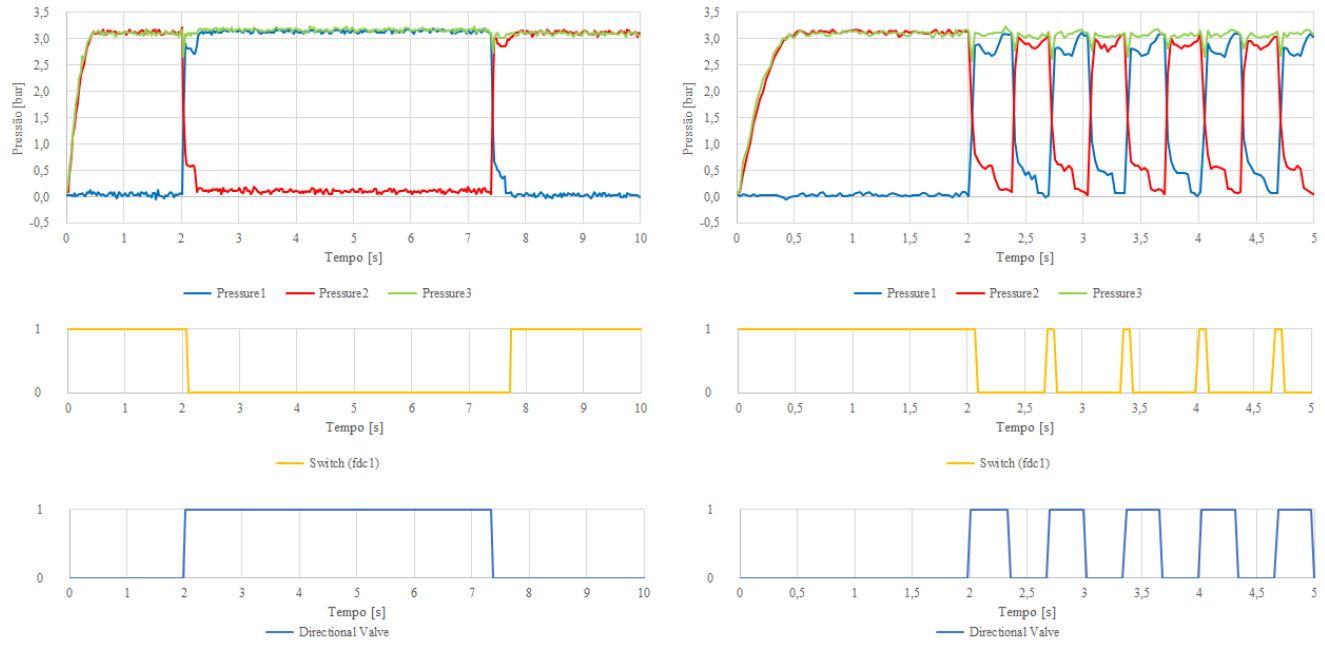


Figura B2 - Configuração "sistema pneumático nº1": 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 3 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 3 bar (à direita)

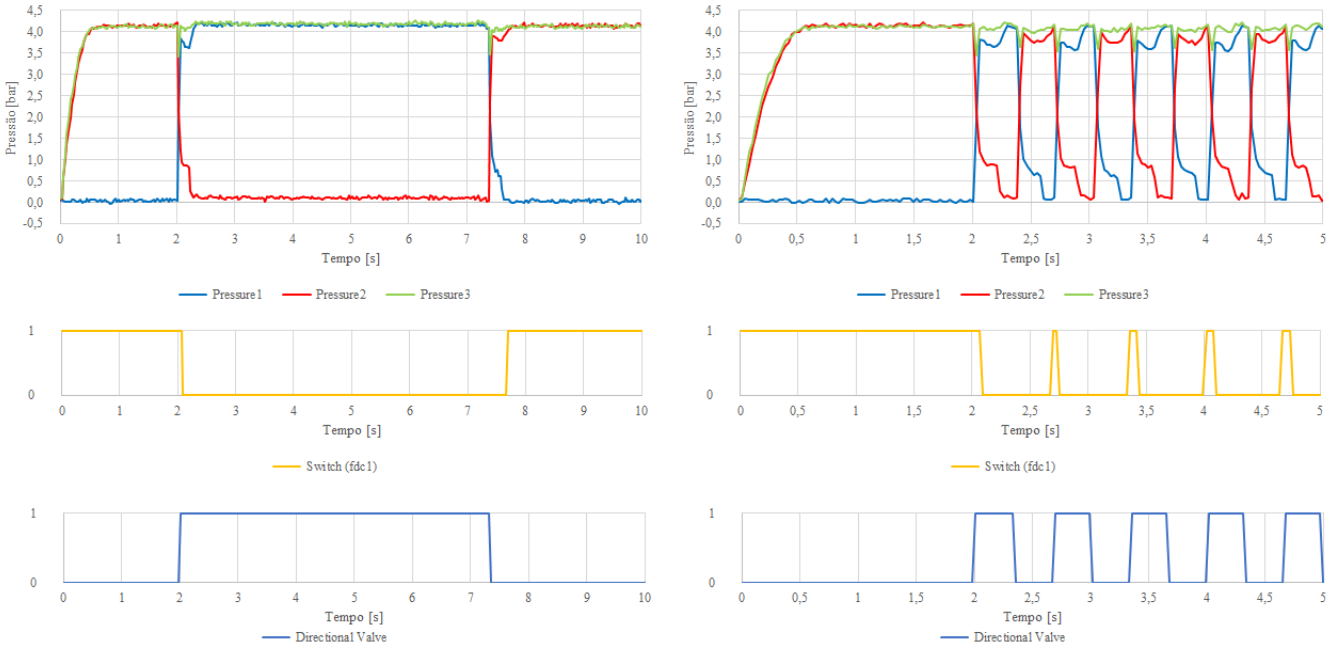


Figura B3 - Configuração "sistema pneumático nº1": 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 4 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 4 bar (à direita)

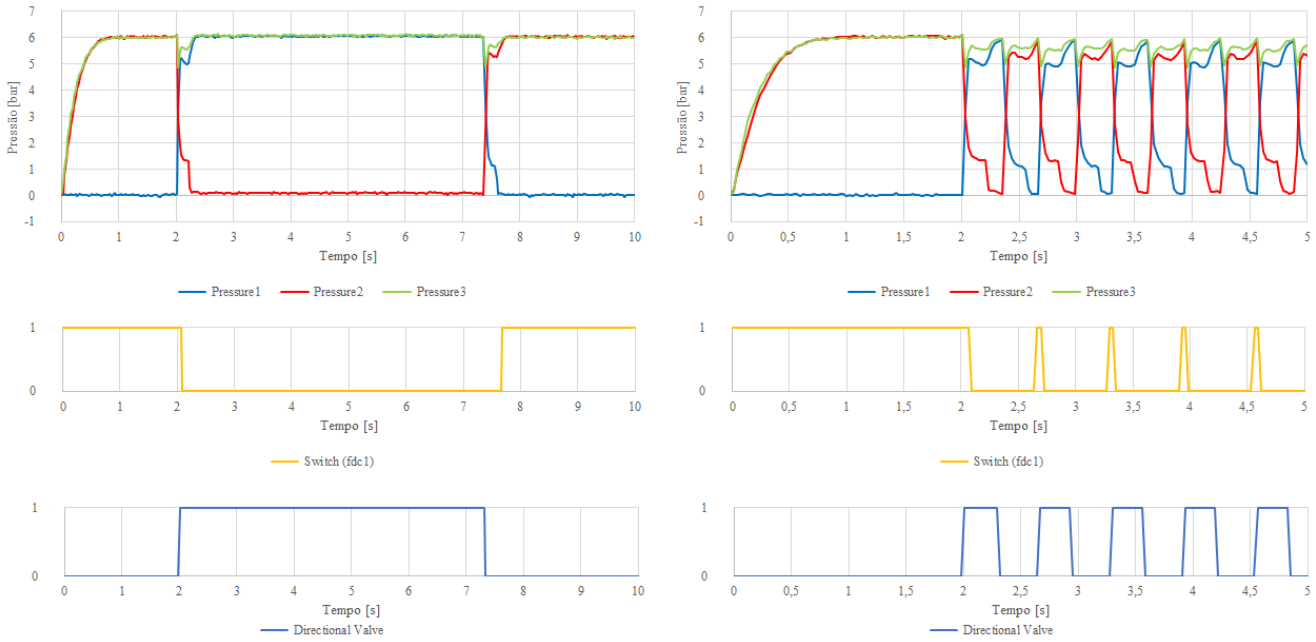


Figura B4 - Configuração "sistema pneumático nº1": 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 6 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 6 bar (à direita)

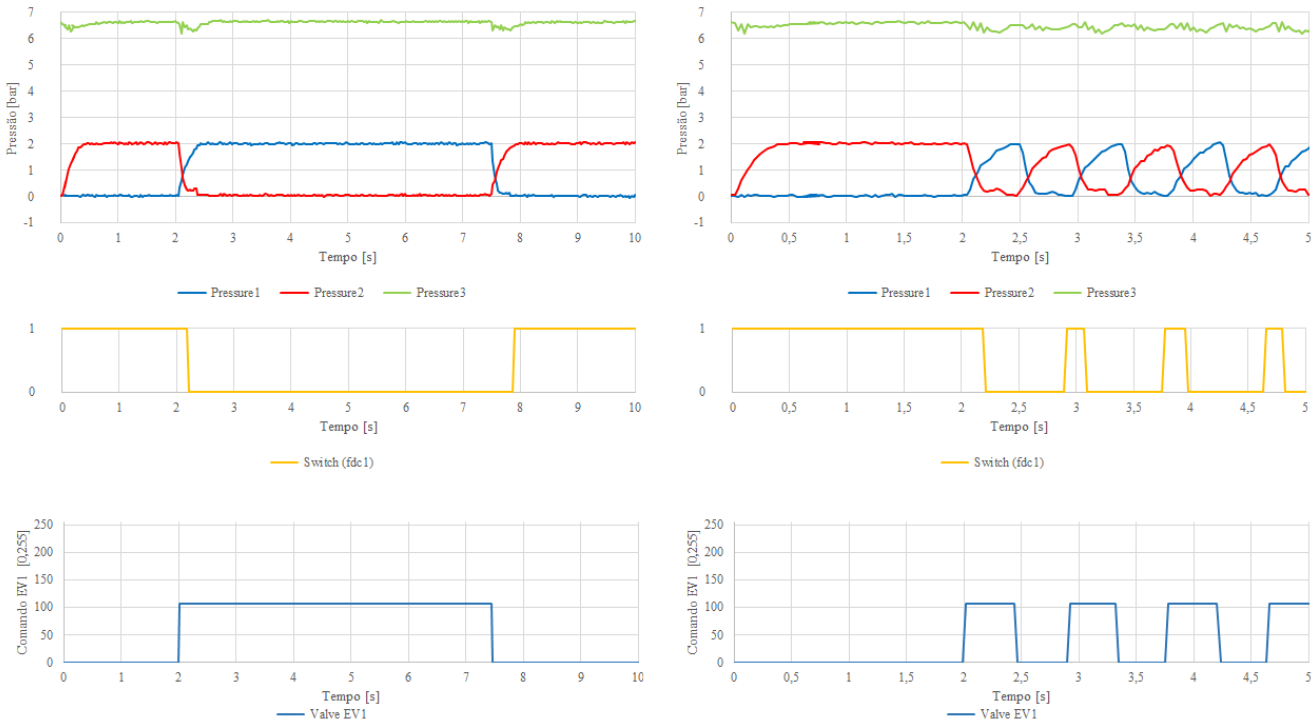


Figura B5 - Configuração "sistema pneumático nº2": 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 2 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 2 bar (à direita)

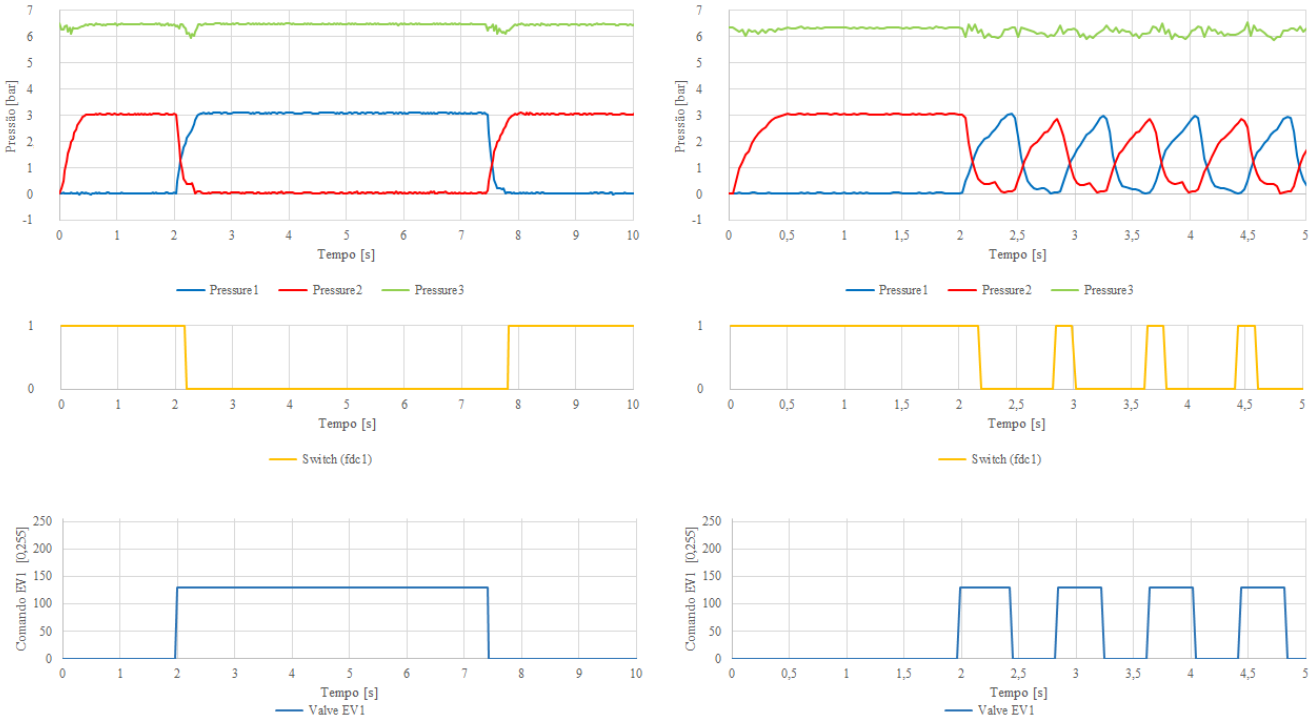


Figura B6 - Configuração "sistema pneumático nº2": 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 3 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 3 bar (à direita)

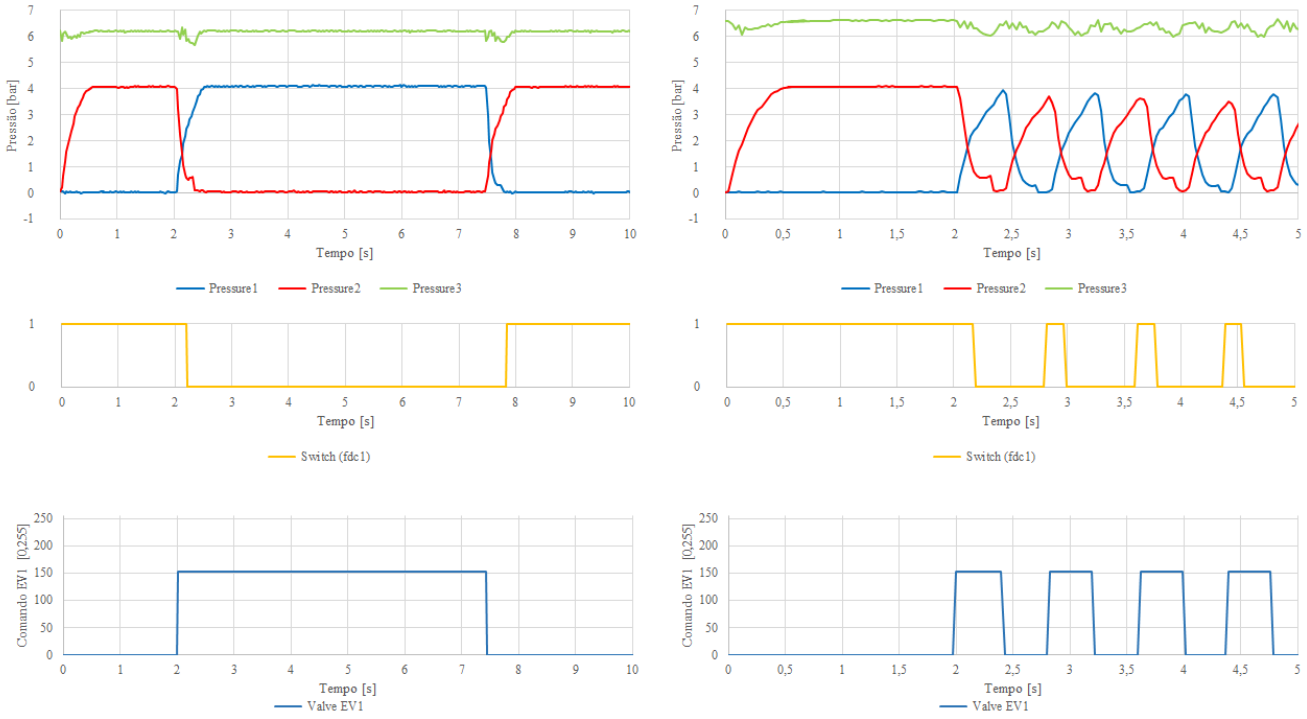


Figura B7 - Configuração "sistema pneumático nº2": 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 4 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 4 bar (à direita)

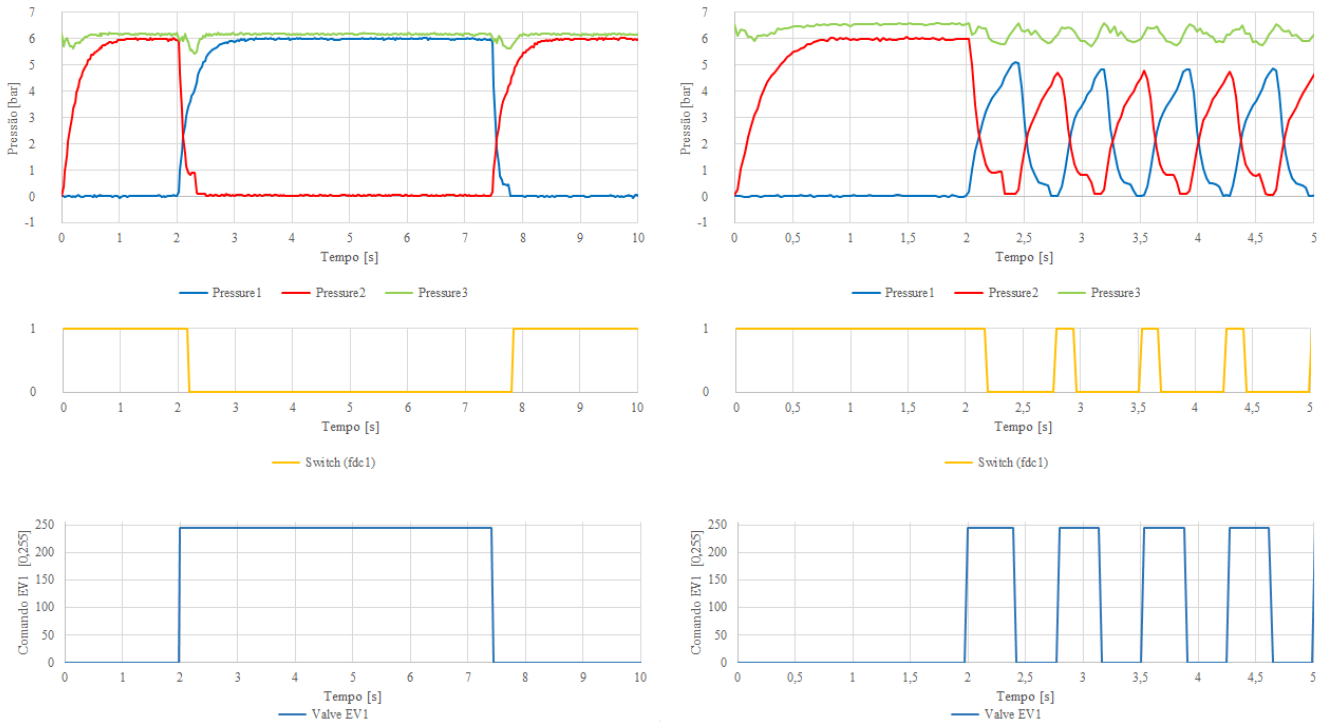


Figura B8 - Configuração “sistema pneumático nº2”: 10 segundos iniciais do teste de 20 movimentos com temporizações, de cinco segundos, no avanço e no recuo para pressão de trabalho de 6 bar (à esquerda); 5 segundos iniciais do teste de 20 movimentos sem temporizações para pressão de trabalho de 6 bar (à direita)

ANEXO C: Resultados dos ensaios de temperatura e humidade relativa do ar

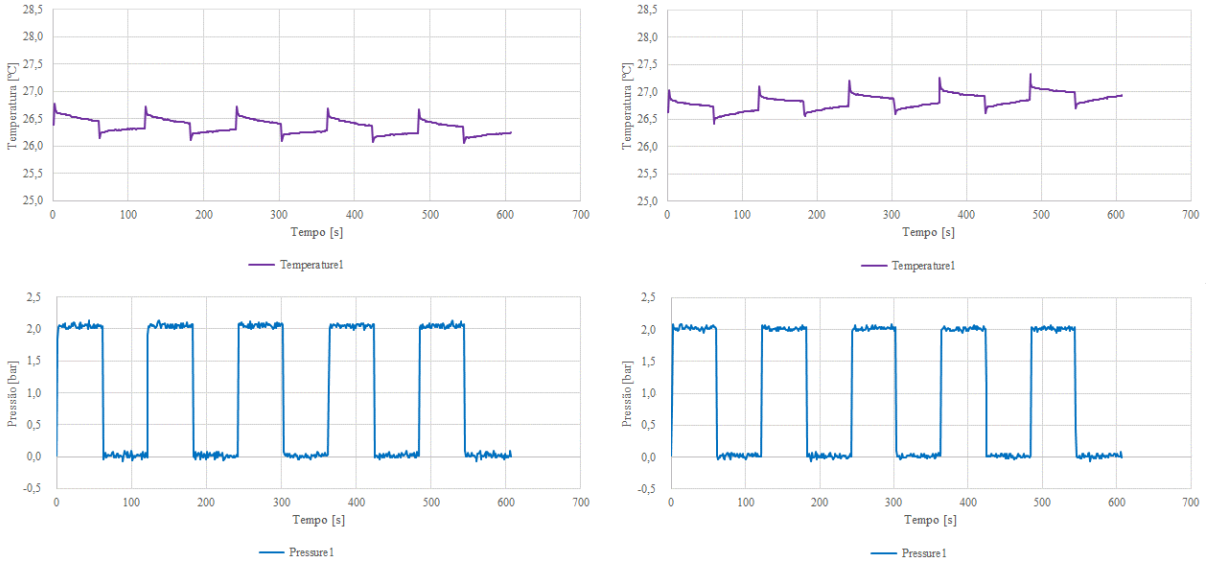


Figura C1 - Perfis de temperatura do ar na câmara 1 obtidos os ensaios realizados utilizando a pressão de trabalho de 2 bar (configuração “sistema pneumático nº1”, à esquerda, e configuração “sistema pneumático nº2”, à direita)

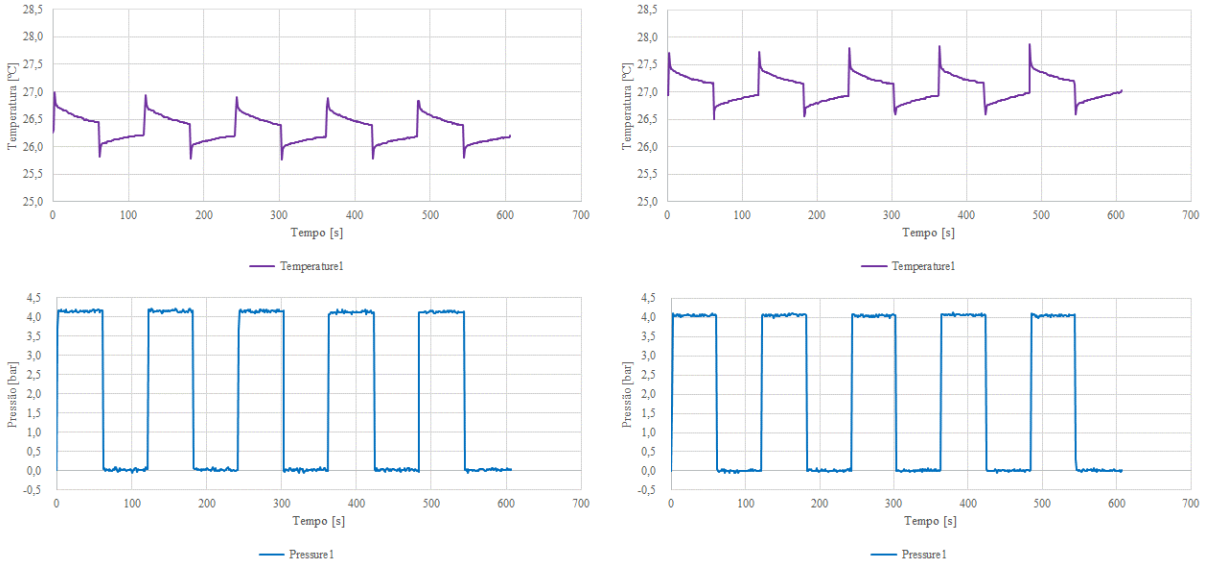


Figura C2 - Perfis de temperatura do ar na câmara 1 obtidos os ensaios realizados utilizando a pressão de trabalho de 4 bar (configuração “sistema pneumático nº1”, à esquerda, e configuração “sistema pneumático nº2”, à direita)

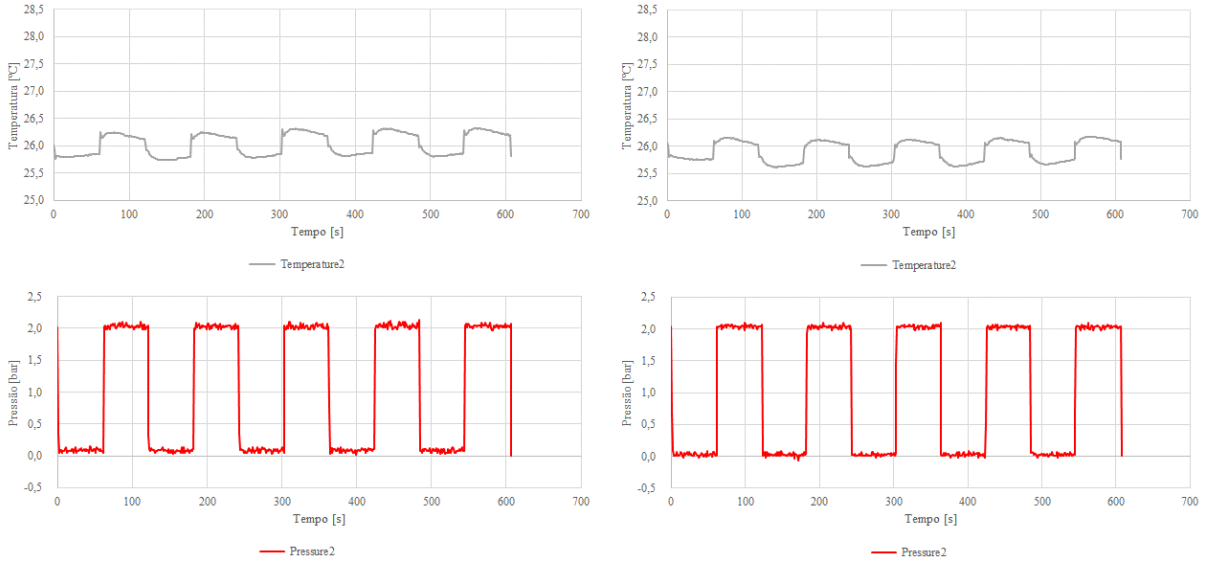


Figura C3 - Perfis de temperatura do ar na câmara 2 obtidos para os ensaios realizados utilizando a pressão de trabalho de 2 bar (configuração "sistema pneumático nº1", à esquerda, e configuração "sistema pneumático nº2", à direita)

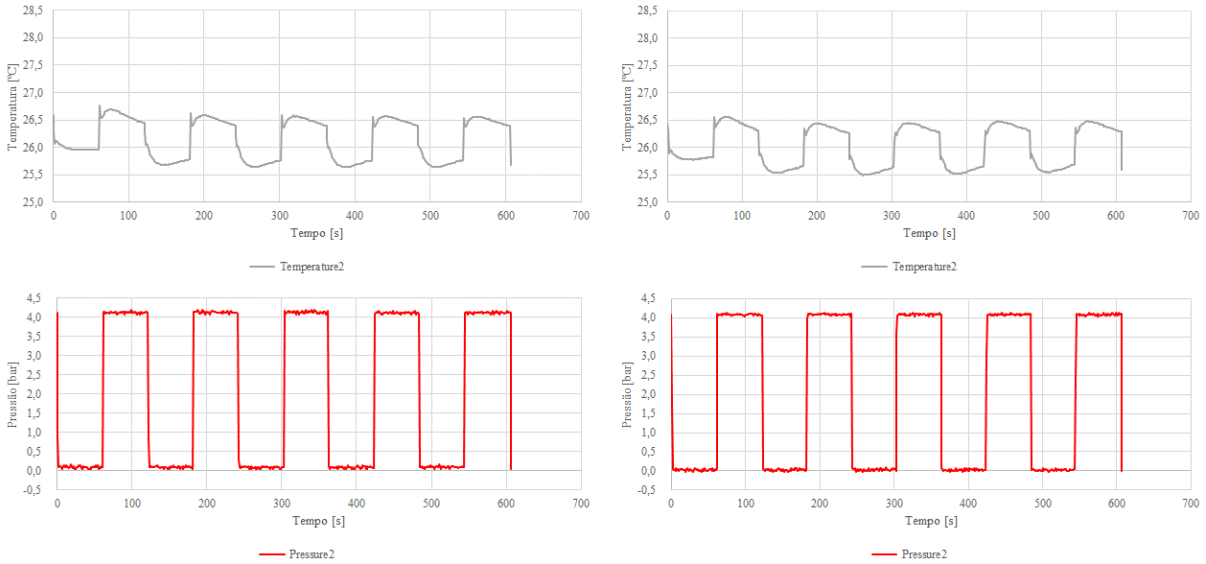


Figura C4 - Perfis de temperatura do ar na câmara 2 obtidos para os ensaios realizados utilizando a pressão de trabalho de 4 bar (configuração "sistema pneumático nº1", à esquerda, e configuração "sistema pneumático nº2", à direita)

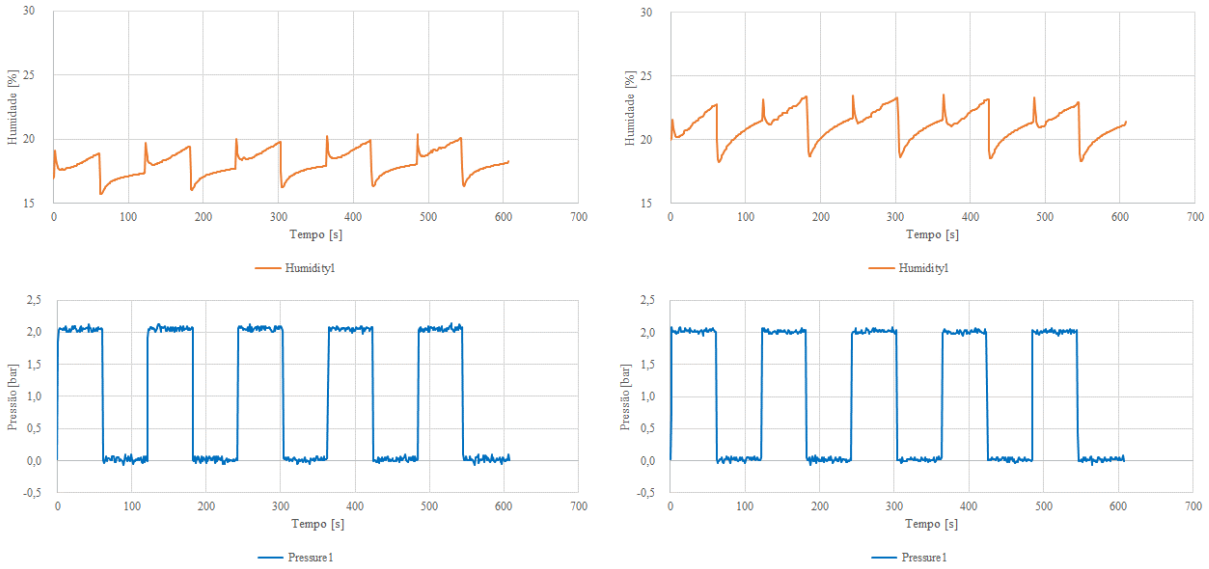


Figura C5 - Perfis de humidade relativa do ar na câmara 1 obtidos para os ensaios realizados utilizando a pressão de trabalho de 2 bar (configuração "sistema pneumático nº1", à esquerda, e configuração "sistema pneumático nº2", à direita)

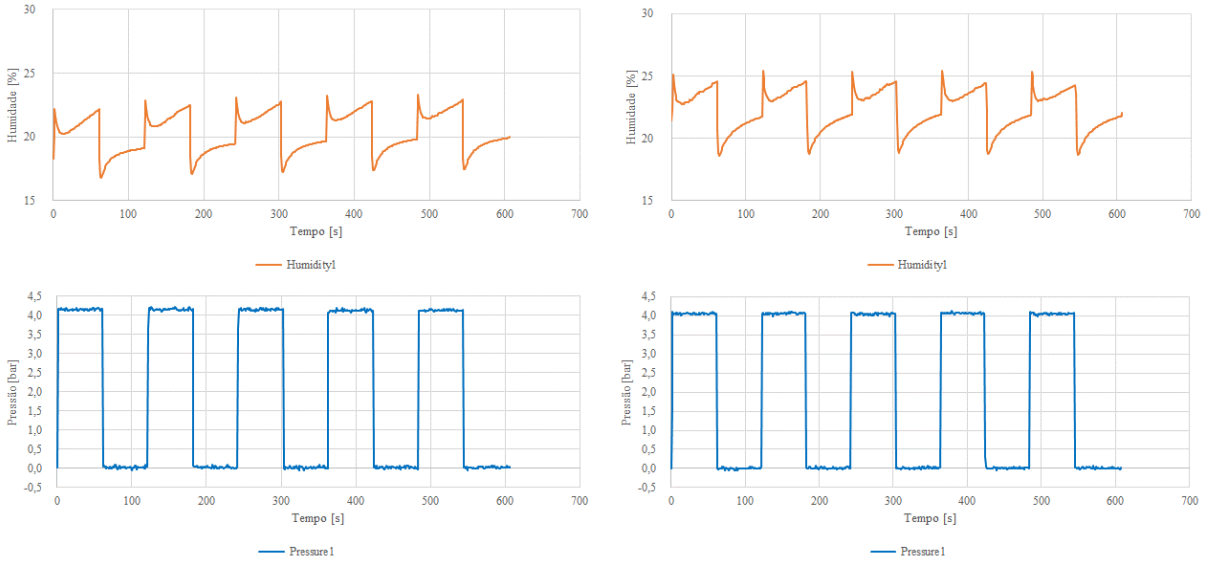


Figura C6 - Perfis de humidade relativa do ar na câmara 1 obtidos para os ensaios realizados utilizando a pressão de trabalho de 4 bar (configuração "sistema pneumático nº1", à esquerda, e configuração "sistema pneumático nº2", à direita)