



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

## **Controlo e Monitorização de UTA com sistema de Aquecimento/Arrefecimento integrado**

**JOÃO TIAGO COUTINHO NUNES**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica.

Orientadores:

Doutor Pedro Miguel Abreu Silva  
Engenheiro Rui Pedro Tomás dos Santos

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Especialista Manuel Duarte Dias Mendes Nogueira  
Doutor Pedro Miguel Abreu Silva

**Dezembro de 2017**





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

## **Controlo e Monitorização de UTA com sistema de Aquecimento/Arrefecimento integrado**

**JOÃO TIAGO COUTINHO NUNES**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica.

Orientadores:

Doutor Pedro Miguel Abreu Silva  
Engenheiro Rui Pedro Tomás dos Santos

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Especialista Manuel Duarte Dias Mendes Nogueira  
Doutor Pedro Miguel Abreu Silva

**Dezembro de 2017**



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Pedro Silva, pela oportunidade de realizar um estágio de natureza profissional, na empresa Sandometal, para a concretização desta dissertação, e também pelo tempo dispendido na resolução de problemas e dificuldades que surgiram no decorrer do trabalho.

Agradeço aos colaboradores da Sandometal, António Oliveira, Carolina Fernandes, Inês Pombo, Jorge Duarte, Miguel Alves, Pedro Duarte, Rui Santos e Ricardo Silva por todo o apoio e integração no ambiente da empresa.

Aos meus colegas do ISEL e amigos que de algum modo tiveram impacto ao longo do meu percurso académico no ISEL, David Costa, Diogo Gomes, Hugo Almeida, Marisa Alves, Márcia Ferreira, Magalie Cunha, Margarida Ribeiro, Nuno Guerreiro, Rita Dias, Rui Tomé, Sara Rodrigues, muito obrigado.

Um especial agradecimento aos meus pais, Conceição Coutinho e Luís Nunes, e à minha irmã, Raquel Nunes, que me apoiaram e motivaram em todos os momentos, contribuindo para esta etapa importante da minha vida.

Por último, mas não menos importante, um grande agradecimento à minha namorada, Bárbara Brito, por ter estado sempre presente, e mesmo nos maus momentos ter tido a paciência e dado o apoio necessário para concluir esta dissertação.



## Resumo

Os sistemas de climatização, ou sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) apresentam elevados valores de consumo energético a nível mundial, o que representa preocupações crescentes em termos económicos e ambientais. Assim, a necessidade de melhorar a eficiência energética dos sistemas de climatização obriga à utilização de equipamentos de elevado desempenho e de mecanismos de controlo mais sofisticados.

Na presente dissertação de mestrado, analisou-se e ensaiou-se uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, que é um tipo de UTA de menores dimensões e que pode substituir os sistemas de climatização mais complexos e de menor eficiência energética. Com vista a contribuir para a exploração destes novos sistemas integrados, desenvolveu-se um algoritmo de controlo e respetiva programação, para controlar o funcionamento da UTA através da respetiva temperatura de insuflação.

Realizaram-se vários ensaios dos equipamentos, cujos resultados mostraram que se consegue um bom desempenho da UTA quando controlada pelo algoritmo desenvolvido e sua programação. Em particular concluiu-se que as condições pretendidas de temperatura se alcançam com um menor trabalho dos ventiladores, com uma maior abertura de válvula de expansão e com um maior trabalho do compressor. O consumo das várias componentes da UTA pode ser minimizado através do seu controlo conjugado.

Palavras-chave: sistemas de AVAC, UTA, sistemas de controlo, eficiência energética.



## **Abstract**

The Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems high values of energy consumption worldwide, represent growing concerns in economic and environmental terms. Therefore, the need to improve the energy efficiency of HVAC systems requires the use of high performance equipment and more sophisticated control techniques.

In this dissertation, an Air Handling Unit (AHU) with an integrated heating/cooling system was analysed and tested; This is a smaller type of AHU which can replace the more complex air conditioning systems that have lower energy efficiency. In order to contribute to expand the use of these new integrated systems, a controlling algorithm and its programming have been developed to manage the operation of the AHU, essentially through the control of the temperature of supply air.

Several tests of the equipment were carried out, whose results showed that an adequate performance of the AHU is obtained when it is controlled by the algorithm and the programming that has been developed. It has been found that the desired temperature conditions (*setpoint*) are achieved with less work of the fans, with larger opening of the expansion valve and with increased work of the compressor. The power consumption of the components of the AHU can be minimized when its control is combined.

Key words: HVAC systems, AHU, control systems, energy efficiency.



## **Lista de Acrónimos**

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

PID – Proporcional-Integral-Derivativo

PLC – *Programmable Logic Controller*

EPA – *Efficiency Particulate Air Filters*

HEPA – *High Efficiency Particulate Air Filters*

ULPA – *Ultra Low Penetration Air Filters*



# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Lista de Acrónimos .....	vii
Capítulo 1. Introdução .....	1
1.1. Motivações .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estado de Arte .....	4
Capítulo 2. Controlo Automático de Sistemas .....	7
2.1. Conceitos básicos.....	8
2.1.1. Anel de controlo .....	9
2.1.2. Modelação de um Sistema de Controlo Automático .....	11
2.2. Controladores industriais .....	17
2.3. Acerto de parâmetros de controladores.....	19
2.4. Sistemas de controlo em equipamentos industriais, controladores e autómatos .....	21
Capítulo 3. Unidades de Tratamento de Ar.....	27
3.1. Conceitos básicos.....	27
3.2. Componentes essenciais.....	28
3.2.1. Ventiladores.....	28
3.2.2. Registos de caudal .....	29
3.2.3. Recuperadores de calor .....	30
3.2.4. Baterias de Aquecimento/Arrefecimento.....	31

3.2.5.	Compressores .....	33
3.2.6.	Humidificadores .....	34
3.2.7.	Caixa de mistura .....	35
3.2.8.	Filtros de ar.....	37
3.3.	Estruturas de controlo. Tipo de controlo mais utilizado nestes elementos. ....	39
Capítulo 4.	Caso de Estudo .....	41
4.1.	Constituição da Unidade de Tratamento de Ar .....	41
4.2.	Características da Unidade de Tratamento de Ar .....	50
4.3.	Hardware de Controlo .....	53
4.4.	Software de Controlo .....	56
Capítulo 5.	Ensaio Experimental e Interpretação de Resultados.....	63
5.1.	Algoritmo de Controlo .....	63
5.2.	Programação desenvolvida.....	66
5.2.1.	Programação das variáveis de entrada e saída.....	67
5.2.2.	Programação da lógica de controlo.....	70
5.3.	Ensaio experimental.....	81
5.3.1.	Acerto de parâmetros de controlo.....	82
5.3.2.	Influência dos Ventiladores.....	89
5.3.3.	Influência da Válvula de Expansão .....	91
5.3.4.	Influência do compressor .....	94
5.4.	Eficiência energética .....	96
Capítulo 6.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	97
Capítulo 7.	Referências Bibliográficas .....	99

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Métodos de controlo na indústria [12] .....	6
Figura 2.1 – Regulador de pêndulo centrífugo concebido por James Watt em 1788 [13] 7	
Figura 2.2 – Controlo em anel aberto .....	9
Figura 2.3 – Controlo em anel fechado .....	10
Figura 2.4 – Sistema dinâmico .....	11
Figura 2.5 – Processo de modelação de um sistema de controlo automático .....	13
Figura 2.6 – Resposta de um sistema dinâmico de primeira ordem .....	15
Figura 2.7 – Resposta de um sistema dinâmico de segunda ordem para diferentes valores do coeficiente de amortecimento [14].....	16
Figura 2.8 – Curva da resposta do sistema para aplicação do método da resposta em degrau.....	19
Figura 2.9 – Autómatos programáveis da Delta Electronics, Inc. [18].....	22
Figura 2.10 – Estrutura de um autómato programável (ou PLC) .....	23
Figura 2.11 - Exemplo de Linguagem LAD.....	24
Figura 2.12 – Exemplo Linguagem FBD .....	24
Figura 2.13 – Exemplo de Linguagem SFC .....	25
Figura 2.14 – Exemplos de Linguagem ST (esquerda) e IL (direita) .....	25
Figura 3.1 – Ilustração da circulação de ar numa UTA da marca Daikin .....	27
Figura 3.2 – Ventilador centrífugo ZIEHL-ABEGG modelo CPro [21] .....	29
Figura 3.3 - Registo de caudal: manual (esquerda); com atuador elétrico (direita) [23] 30	
Figura 3.4 – Recuperadores de calor do tipo: rotativo (esquerda)[24]; placas (direita) [25] .....	31
Figura 3.5 – Bateria a vapor (esquerda); Bateria de aquecimento/arrefecimento a água (centro); Bateria de expansão direta (direita) .....	32

Figura 3.6 – Fluidos primários e secundários mais utilizados na indústria nacional de produtos alimentares[26].....	33
Figura 3.7 – Compressão em espiral.....	34
Figura 3.8 – Exemplo de Humidificador a vapor .....	35
Figura 3.9 – Circulação do ar no interior de uma UTA com caixa de mistura .....	36
Figura 3.10 – Tipos de caixa de mistura: fluxos de ar paralelos (a), fluxos de ar opostos (b), fluxos de ar a 90° (c).....	36
Figura 4.1 – Componentes da UTA utilizada como caso de estudo.....	41
Figura 4.2 – Registos de caudal com atuador elétrico .....	42
Figura 4.3 – Ventiladores Ziehl-Abegg modelo Cpro-ECblue RH40C-ZID .....	43
Figura 4.4 – Pré-filtros G4 (esquerda); Filtro F7 (direita) .....	43
Figura 4.5 – Recuperador de Calor rotativo da Enventus modelo ST1-N-W-1150-CS-V .....	44
Figura 4.6 – Variador de frequência MicroMax-180 [24] .....	44
Figura 4.7 – Bateria de aquecimento/arrefecimento (esquerda); Compressor (direita)..	45
Figura 4.8 – Variador de frequência do compressor.....	46
Figura 4.9 – Válvula de expansão (esquerda); Válvula de 4 vias (direita) .....	46
Figura 4.10 – Sensor de pressão Siemens QBE9002-P [30] .....	47
Figura 4.11 – Circuito do compressor.....	47
Figura 4.12 – Sensor de Temperatura .....	48
Figura 4.13 – Toma de Pressão (esquerda); Pressóstato (direita).....	49
Figura 4.14 – Transdutor de pressão.....	49
Figura 4.15 – Sentido de fluxo de ar na UTA .....	50
Figura 4.16 – Ciclo frigorífico adaptado de [27].....	51
Figura 4.17 – Ciclo do gás refrigerante em modo de Aquecimento .....	52
Figura 4.18 – Ciclo do gás refrigerante em modo de Arrefecimento .....	52

Figura 4.19 – Controlador POL638.00 (esquerda), Expansão POL955.00 (direita) .....	53
Figura 4.20 – Quadro elétrico da UTA .....	54
Figura 4.21 – Logótipo do software: SAPRO (esquerda), SCOPE (direita).....	56
Figura 4.22 – Interface do utilizador do software SAPRO (Siemens-Climatix).....	57
Figura 4.23 – Blocos de funções lógicas de comparação matemática.....	59
Figura 4.24 – Funções lógicas matemática .....	59
Figura 4.25 – Funções de lógica booleana .....	59
Figura 4.26 – Bloco de seleção.....	60
Figura 4.27 – Blocos de temporização.....	60
Figura 4.28 – Blocos de conversão .....	60
Figura 4.29 – Blocos de deteção de variações numa variável booleana .....	61
Figura 4.30 – Interface do utilizador do software SCOPE (Siemens-Climatix) .....	61
Figura 5.1 – Diagrama dos blocos principais do programa desenvolvido .....	66
Figura 5.2 – Diagrama das ligações de variáveis de entrada e de saída no controlador (bloco à esquerda) e na expansão (bloco à direita) .....	67
Figura 5.3 – Exemplo de <i>Analog Input</i> - Temperatura_ArNovo.....	68
Figura 5.4 – <i>AnalogInput</i> - Pressao_ventilador_Insulf.....	68
Figura 5.5 – Exemplo de <i>AnalogOutput</i> – Recuperador_Calor .....	68
Figura 5.6 – Exemplo de <i>BinaryInput</i> - OnOff_Remoto .....	69
Figura 5.7 – Exemplo de <i>BinaryOutput</i> – OnOff_Ventiladores.....	69
Figura 5.8 – Programação do bloco "Manager" .....	70
Figura 5.9 – Abertura ou Fecho dos registos.....	71
Figura 5.10 – Temporizador antecedente ao arranque dos ventiladores.....	71
Figura 5.11 – Loop de controlo do Ventilador de Insuflação .....	73
Figura 5.12 – Controlo do Recuperador de Calor.....	75
Figura 5.13 – Programação do modo de operação da UTA.....	76

Figura 5.14 – Programação do bloco “Manager_compressor” .....	76
Figura 5.15 – Sinal de arranque ou paragem do compressor .....	77
Figura 5.16 – Processo de arranque do compressor e da válvula de expansão .....	78
Figura 5.17 – Processo de paragem do compressor e da válvula de expansão .....	79
Figura 5.18 – Processo de mudança do ciclo frigorífico.....	80
Figura 5.19 – Bloco “Alarmes” .....	80
Figura 5.20 – Ensaio 1 – Controlo de ventiladores.....	82
Figura 5.21 – Ensaio 2 -Controlo de ventiladores .....	83
Figura 5.22 - Ensaio 3 – Controlo de ventiladores .....	83
Figura 5.23 – Ensaio 4 - Controlo de ventiladores .....	84
Figura 5.24 – Ensaio 5 - Controlo de ventiladores .....	85
Figura 5.25 – Ensaio 6 - Controlo de ventiladores .....	85
Figura 5.26 – Ensaio 7 - Controlo de ventiladores .....	86
Figura 5.27 – Ensaio 8 - Controlo de ventiladores .....	87
Figura 5.28 – Ensaio 9 - Controlo de ventiladores .....	87
Figura 5.29 – Ensaio 10 - Controlo de ventiladores .....	88
Figura 5.30 – Ensaio 1 – Influência dos ventiladores.....	89
Figura 5.31 – Ensaio 2 – Influência dos ventiladores.....	89
Figura 5.32 – Diferença entre as temperaturas de ar novo e de insuflação para os dois ensaios da influência dos ventiladores.....	90
Figura 5.33 – Pressões nos sensores de alta e baixa pressão.....	92
Figura 5.34 – Temperatura de Insuflação nos ensaios de influência da válvula de expansão .....	93
Figura 5.35 – Ensaio 1 da influência do compressor.....	94
Figura 5.36 – Ensaio 2 da influência do compressor.....	95

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Acerto de parâmetros segundo o método da resposta ao degrau.....	20
Tabela 2.2 – Acerto de parâmetros segundo o método $K_{cr}$ .....	20
Tabela 3.1 – Classificação de filtros baseada na norma EN 779:2012 [28].....	37
Tabela 3.2 – Classificação de filtros de elevada eficiência baseada na norma EN 1822:2009 [29] .....	38
Tabela 4.1 – Lista de pontos para o controlador POL638.00.....	55
Tabela 4.2 – Lista de pontos para a expansão POL955.00 .....	56
Tabela 4.3 – Objetos do software SAPRO .....	58
Tabela 5.1 – Variáveis de entrada e de saída do controlador .....	63
Tabela 5.2 – Variáveis de entrada e de saída da expansão do controlador .....	63



# Capítulo 1. Introdução

## 1.1. Motivações

O tema do aquecimento e do arrefecimento para fins de conforto térmico em edifícios, tem-se tornado cada vez mais central nas sociedades modernas, com a eficiência energética sendo um dos aspetos mais importantes num contexto de Aquecimento Global.

As economias atuais exigem assim que se “produza mais, com menos recursos”, o que no domínio dos sistemas de aquecimento e de arrefecimento significa, equipamentos mais eficientes e mais económicos, em particular os que utilizam na indústria e nos serviços, que são os que apresentam os valores mais elevados de consumo energético, com impactos significativos em termos de recursos energéticos.

Nesta dissertação são então abordados os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC), os quais se utilizam em edifícios de escritórios e instalações industriais em todo o mundo.

Os sistemas de AVAC são geralmente constituídos por vários equipamentos, incluindo caldeiras, unidades de produção de água fria (também designados por *chiller*), unidades de tratamento de ar (UTA) e unidades terminais de volume de ar variável (VAV). O foco principal deste trabalho é a UTA e a respetiva melhoria de eficiência energética através de técnicas de controlo automático de sistemas.

## 1.2. Objetivos

Sendo este, um trabalho final de mestrado com estágio de natureza profissional, o principal objetivo é a realização de um caso de estudo em que possam ser aplicados os conhecimentos teóricos numa aplicação prática. O estágio foi realizado na empresa Sandometal, Metalomecânica e Ar-Condicionado, S.A., sediada em Alverca do Ribatejo, Vila Franca de Xira, onde foram disponibilizados os equipamentos e as condições necessárias para a realização do caso de estudo.

A UTA disponibilizada pela Sandometal para este estudo foi uma UTA com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, que ainda não tinha sido programada; por conseguinte, definiram-se os seguintes objetivos para a realização deste trabalho:

- Desenvolvimento de algoritmos de controlo para uma UTA com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado;
- Desenvolvimento de metodologias que possibilitem um aumento da eficiência energética nestas unidades;
- Programação de software de base que sirva para a utilização generalizada neste tipo de sistemas.

### 1.3. Metodologia

Os princípios para o presente trabalho estão sustentados pela literatura científica atual relacionada com sistemas AVAC, cujo estado da arte se descreve no ponto 1.4 deste capítulo.

Os conceitos teóricos de controlo relevantes para o trabalho, bem como a sua aplicação em equipamentos industriais são abordados no capítulo 2, Controlo Automático de Sistemas. E no capítulo 3, é descrita a constituição típica de uma UTA, bem como das principais características e modos de funcionamento dos equipamentos geralmente aplicados em UTAs. Além disso, é ainda abordado os tipos de controlo mais utilizados numa UTA, as suas vantagens e desvantagens.

Para alcançar os objetivos definidos, começou-se por descrever a UTA utilizada como caso de estudo (capítulo 4), onde são apresentados os seus componentes e o funcionamento do sistema de aquecimento e arrefecimento integrado. A compreensão da metodologia de controlo aplicada, requer a descrição do hardware de controlo presente na UTA, assim como a descrição do software de controlo.

Com base no hardware e software disponíveis foi desenvolvido um algoritmo de controlo e respetiva programação para o funcionamento da UTA (descritos no capítulo 5). Foram depois efetuados dois tipos de ensaios da UTA, um tipo de ensaio para acerto dos parâmetros do controlador do ventilador, com recolha de dados de valores de caudal, e outro tipo de ensaios para análise da influência dos ventiladores, da válvula de expansão e do compressor sobre a temperatura de insuflação, para os quais foram recolhidos valores de temperatura e de pressão. Os resultados obtidos que foram analisados permitiram obter algumas conclusões sobre diversas condições de funcionamento da UTA, com base nos algoritmos e programação de controlo desenvolvidos.

## 1.4. Estado de Arte

Nas últimas décadas, a eficiência energética tem sido alvo de estudo, uma vez que se pretende obter sempre o menor consumo de energia e conseqüentemente diminuir custos. Nos países da União Europeia (EU), o consumo de energia dos edifícios domésticos ou industriais representa mais de 40% da energia total consumida, em que mais de 50% deste consumo dos edifícios é utilizado em sistemas de AVAC [1]. Como tal, diferentes estratégias de controlo encontram-se continuamente em desenvolvimento nesta área.

Serrano e Reyes em 1999 [2], aplicaram um controlador não linear para um sistema de AVAC com unidades terminais de volume de ar variável capaz de manter as condições de conforto num determinado espaço. Simultaneamente o objetivo da aplicação deste tipo de controlador é obter consumos de energia inferior comparativamente com os consumos obtidos com métodos de controlo tradicionais, tal como controladores *On-Off* ou *PID* (Proporcional-integral-derivativo), que são métodos de baixa eficiência energética.

Posteriormente, Huaguang e Cai, 2002 [3], com os mesmos objetivos do estudo anterior, desenvolveram um modelo de controlo adaptativo não linear descentralizado (DNAC) constituído por “single input fuzzy logic control (SFLC)” e “frequency-domain adaptive compensator (FDAC)”, tendo obtido menores consumos com o modelo DNAC do que a aplicação isolada do controlo SFLC.

Tradicionalmente uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) é controlada por um controlador PID devido à sua relativa simplicidade e baixo custo. No entanto, em casos específicos, em que são requeridas condições específicas, como por exemplo variações muito pequenas na temperatura e na humidade relativa do ar no espaço em causa, deve recorrer-se a métodos de controlo avançados e mais complexos para se obter um melhor desempenho. Guo *et al*, 2005 [4] propõe uma estratégia de controlo em cascata assistido por uma rede neuronal para o sistema de controlo de temperatura de uma UTA. Foi realizada a comparação e análise entre a presença de um simples controlador PID, um controlo em cascata tradicional e um controlo em cascata assistido por uma rede neuronal (conhecido por *Neural-Network*).

Nos anos 60, Lotfi Zadeh, propôs a utilização de Lógica Fuzzy para aplicações de controlo de sistemas automáticos. Até ao momento, vários estudos em controlo de

sistemas de AVAC, aplicaram um controlador de Lógica Fuzzy isoladamente como em [5] e [6], ou até mesmo conjugada com outras metodologias de controlo nos estudos [3] e [7]. No caso, do estudo de Fakhruddin *et al.* 2016 [5], foi aplicado apenas um controlador de Lógica Fuzzy com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica dos principais componentes de um sistema de Ar-Condicionado.

Attia *et al.* 2015 [6], utilizou por motivos comparativos, um controlador PID com os respetivos parâmetros otimizados para minimizar o erro no sistema. O principal objetivo deste trabalho foi a aplicação de um controlador baseado na Lógica Fuzzy num sistema de Ar-Condicionado em edifícios residenciais, de modo a melhorar a sua eficiência. A comparação dos resultados destes dois tipos de controlo mostrou que o controlador de Lógica Fuzzy foi capaz de manter as condições de temperatura e humidade relativa pretendidas quando aplicadas variações de carga, enquanto o controlador PID, falhou ao efetuar o ajuste da temperatura para cargas parciais (inferiores a 100%).

Os maiores contribuintes da baixa eficiência do controlo de sistemas de climatização e respetivas soluções para melhores estratégias de controlo encontram-se resumidamente referidas no estudo, Mařík *et al.* 2012 [8]. Neste foram abordadas três áreas relacionadas com o controlo destes sistemas, eficiência de ferramentas de monitorização, estratégias *Ruled-based Control* e métodos de controlo MBPC (Model Based Predictive Control).

Ferreira *et al.* 2012 [9] aplicaram uma estratégia MBPC com o fim de controlar eficientemente sistemas de AVAC em edifícios públicos e em simultâneo obter as melhores condições de conforto térmico e qualidade do ar interior. Mais tarde, em 2016, foram feitas melhorias ao modelo de controlo anterior e analisadas as melhorias quando implementado a um edifício existente [10].

A aplicação de redes neuronais artificiais (artificial neural network - ANN) nos sistemas de climatização é usualmente designada por *Nonlinear Autoregressive Neural Network* (NARNET), uma vez que estes sistemas apresentam um comportamento dinâmico e não linear. [1]

Dos estudos mais recentes e segundo Belic *et al.*, 2015 [11], observa-se que a maioria dos estudos na área em estudo têm um dos seguintes focos, obter um sistema de controlo melhor relativamente ao controlo clássico, aplicação da estratégia MBPC, ou utilização de métodos de controlo inteligente.

Na Figura 1.1, apresenta-se um sumário dos métodos de controlo aplicados nas indústrias de processos, agrupados em quatro categorias, de acordo com o desenvolvimento de estratégias de controlo ao longo do tempo, A (*Conventional PID Control*), B (*Advanced Control I*), C (*Advanced Control II*), D (*Advanced Control III*). [12]

<b>A</b> <b>Conventional</b> <b>PID Control</b>	<b>B</b> <b>Advanced Control</b> <b>I</b>	<b>C</b> <b>Advanced</b> <b>Control II</b>	<b>D</b> <b>Advanced</b> <b>Control III</b>
Manual Control	Gain Scheduling Method	Robust Control Methods	Hybrid Predictive Control
Feedback Control	Adapting and Self-tuning Control	Optimal Control Methods	Fuzzy Control
Cascade Control	Multivariable Control Methods (State Space and Transfer Function Models)	Model Predictive Control	Neural Network Control
Feedforward Control	Multivariable Control Methods (Decoupling and Decentralized Control)	Decentralized Control	Discrete Events Control
Ratio Control	Pole Placement Methods	Algebraic Control	Nonlinear Hybrid Soft Computing Control
Combined Control Structures	Nonlinear Control	Robust QFT Control Methods	Expert Control Methods

Figura 1.1 - Métodos de controlo na indústria [12]

## Capítulo 2. Controle Automático de Sistemas

Os sistemas de controle têm sido usados desde há milhares de anos. Um dos primeiros foi o relógio de água, concebido em meados do século III A.C., o qual continha um mecanismo de regulação do nível de água num vaso, permitindo regular o fluxo de água no mesmo para controlar o tempo. Posteriormente, foram desenvolvidos variadíssimos sistemas de controle ao longo dos séculos com objetivos simples de auxiliar as tarefas humanas. [13]

Na Europa do século XVII e XVIII, começaram a ser desenvolvidos sistemas de controle automático para simplificar ou até mesmo substituir o homem em tarefas repetitivas, complexas ou que colocavam em risco a sua integridade física. Como tal, surgiu em 1620, o primeiro regulador de temperatura de uma fornalha produzido por Drebbel, e em 1788 James Watt desenvolveu um motor a vapor com regulador de pêndulo centrífugo para controlar a velocidade (Figura 2.1). [13]

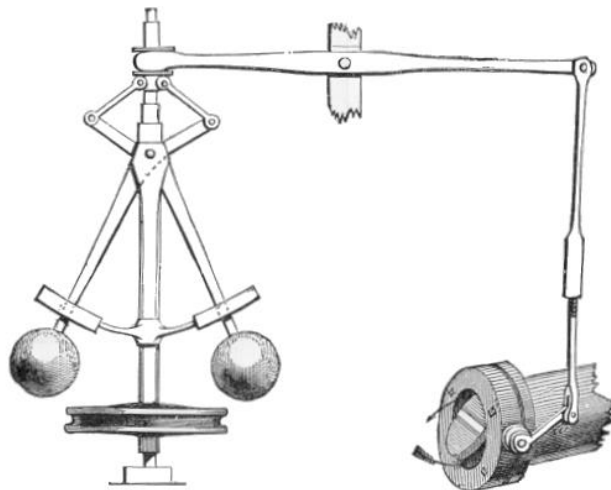


Figura 2.1 – Regulador de pêndulo centrífugo concebido por James Watt em 1788 [13]

Em 1868, Maxwell encontrou, através de equações diferenciais, problemas de estabilidade do sistema de controle criado por James Watt, momento a partir do qual a importância dos modelos e métodos matemáticos foi demonstrada e deu início a teorias matemáticas de sistemas e controle.[13]

Os grandes avanços na teoria de controle de sistemas, ocorreram a partir do século XX, que permitiram efetuar o controle de sistemas dinâmicos mais complexos e com maior

eficiência. As modernas aplicações da indústria e das comunicações, como por exemplo, as comunicações por satélites, as viagens ao espaço, os processos químicos mais eficientes e limpos, só são possíveis com recurso a sistemas de controlo mais sofisticados.

Nos dias de hoje, com o avanço das novas tecnologias, encontram-se sistemas automatizados, em aplicações tanto a nível doméstico como a nível industrial, nos quais o papel principal do controlo é simplificar tarefas ou processos repetitivos ou que de alguma maneira seguem uma lógica identificada.[14]

## 2.1. Conceitos básicos

Neste capítulo, faz-se uma breve abordagem aos conceitos básicos necessários para a compreensão da estrutura e modelação de um Sistema de Controlo Automático:

- Sistema – é um conjunto de componentes físicos ou abstratos cuja combinação de ações permite atingir um objetivo, como, por exemplo, sistemas físicos, sistemas económicos, etc.
- Processo – é uma operação que progride através de um conjunto de ações controladas até se atingir o fim pretendido; existem processos mecânicos, químicos, biológicos, etc.
- Variável Controlada e Variável Manipulada – A variável controlada é definida como uma variável de medição e controlo, enquanto que a variável manipulada é alterada pelo controlador com a finalidade de se obter o valor desejado na variável controlada.
- Perturbações – são o resultado de variações indesejadas no sinal de saída de um sistema, as quais podem ser classificadas em perturbações internas ou perturbações externas dependendo da origem ser intrínseca ou extrínseca ao sistema.

### 2.1.1. Anel de controlo

O controlo automático de sistemas aplica-se em processos ou equipamentos que apresentam variáveis em função do tempo, através da aplicação de metodologias de controlo, de modo a que o sistema apresente um comportamento pretendido. Relativamente ao método de controlo aplicado, este pode ser classificado em duas categorias, o controlo em anel aberto e o controlo em anel fechado:

#### Controlo em Anel Aberto

O sistema controlado depende exclusivamente do sinal de entrada, ou seja, não existe realimentação do sinal de saída a influenciar o sinal de entrada. Esta categoria de controlo consiste na aplicação de uma variável manipulada na entrada do sistema, influenciando de seguida o processo com o objetivo de obter o valor desejado no sinal de saída, conforme a Figura 2.2.

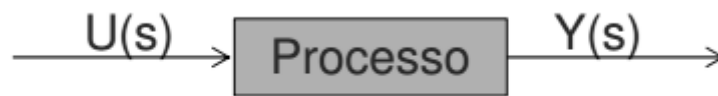


Figura 2.2 – Controlo em anel aberto

Neste tipo de controlo, como o sinal de entrada não depende da variável controlada pelo sinal de saída, os valores desejados podem não ser alcançados quando o sistema se encontrar sob perturbações, quer estas sejam internas ou externas. Isto deve-se ao facto de as perturbações provocarem alterações no sinal de saída e não são reconhecidas pelo sistema, logo a precisão deste tipo de controlo depende da sua correta calibração e da ausência de perturbações.

Assim, as principais características que definem o controlo em anel aberto são a baixa complexidade, o baixo custo, a facilidade de projetar, a elevada sensibilidade a perturbações no sistema e a sua instabilidade.

Um exemplo simples da aplicação de controlo em anel aberto é o controlo de uma torradeira apenas através de um temporizador; o mesmo acontece com qualquer outro equipamento cujo sistema dependa só de um temporizador.

### Controlo em Anel Fechado

Controlo com realimentação do sinal de saída que influencia o sinal de controlo, este “fenómeno” também é designado por *feedback*. Através de um sensor associado ao sinal de saída obtém-se o valor do mesmo, o qual vai ser posteriormente comparado com um valor de referência (*setpoint*) para determinar o respetivo erro (Figura 2.3). Com o valor dessa diferença, ou erro, procede-se à manipulação do sinal de controlo através de um algoritmo ou de uma lógica apropriados à aplicação em causa.

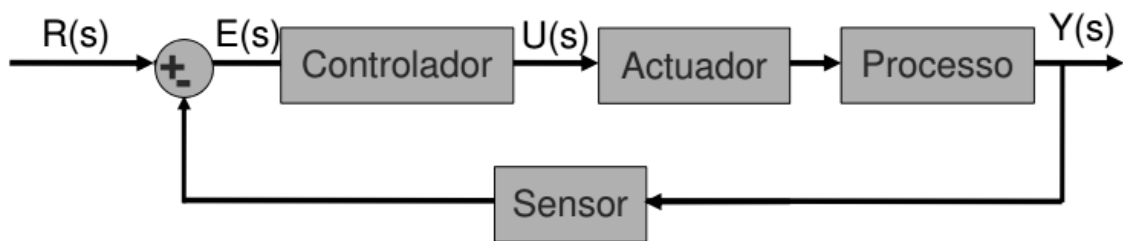


Figura 2.3 – Controlo em anel fechado

$R(s)$  – Referência ou *Setpoint*

$U(s)$  – Variável Manipulada

$E(s)$  – Erro entre valor de entrada e saída

$Y(s)$  – Variável Controlada

Comparativamente com a categoria de controlo em anel fechado, o controlo em anel aberto é mais complexo e mais dispendioso, mas tem as vantagens de ser mais robusto relativamente a perturbações e poderá estabilizar processos instáveis.

Um exemplo de controlo em anel fechado é o controlo da temperatura do motor de um carro, no qual a utilização de um sensor de temperatura permite ativar o ventilador quando se atingem valores elevados de temperatura.

## 2.1.2. Modelação de um Sistema de Controlo Automático

A principal motivação para a modelação de um sistema de controlo automático é o desenvolvimento de novos sistemas e metodologias de controlo com vista à optimização dos sistemas já existentes. Os sistemas dinâmicos (Figura 2.4) são o principal alvo, uma vez que os sinais de saída nestes podem não ser directamente proporcionais aos sinais de entrada e também podem variar mesmo na ausência de sinal de entrada, o que enfatiza a importância do controlo automático destes sistemas.

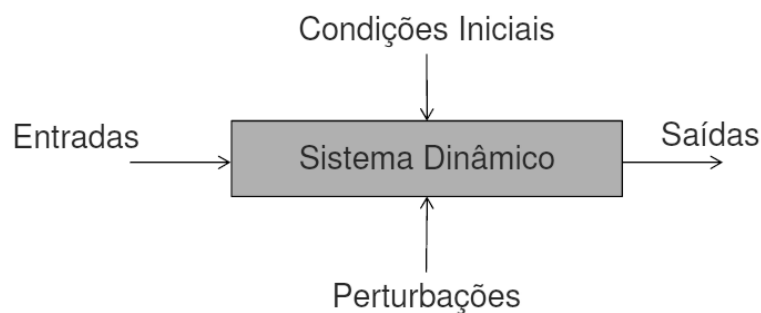


Figura 2.4 – Sistema dinâmico

A dinâmica de um sistema pode ser definida matematicamente por equações diferenciais distintas consoante o tipo de sistema seja mecânico, eléctrico, de nível, térmico, etc. Assim, tais equações podem ser obtidas pelas leis da Física aplicáveis a cada sistema, sendo no caso de um sistema mecânico as leis de Newton e no caso de um sistema eléctrico as leis de Kirchhoff. Porém, a complexidade dos modelos matemáticos terá que ser tanto maior quanto maior o nível de precisão pretendido, ou seja, se o sistema em questão não exigir resultados com elevado rigor o modelo matemático pode ser simplificado. [14]

Um sistema diz-se linear quando o princípio da sobreposição for aplicável, isto é, o resultado de duas excitações distintas em simultâneo equivale ao somatório das respostas das excitações individualmente. Designam-se por sistemas não-lineares quando o princípio da sobreposição não é aplicável. Por outro lado, os sistemas lineares podem ser invariantes ou variantes no tempo, cuja diferença encontra-se nos coeficientes das equações diferenciais serem ou não variáveis em função do tempo.

Geralmente, os sistemas reais apresentam um comportamento não-linear, no entanto, recorre-se frequentemente à linearização do sistema, a qual consiste na aproximação deste para um sistema linear, com o principal objetivo de obter a Função Transferência do sistema, uma vez que a mesma só pode ser determinada para equações diferenciais lineares invariantes no tempo (Equação 2.1, onde  $y$  representa o sinal de saída e  $x$  o sinal de entrada). [14]

$$\begin{aligned} a_0y^{(n)} + a_1y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}\dot{y} + a_ny & \quad (2.1) \\ = b_0x^{(m)} + b_1x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1}\dot{x} + b_mx & \quad (n \geq m) \end{aligned}$$

A partir do momento em que as equações diferenciais dos sinais de entrada e saída do sistema se encontram definidas, procede-se à aplicação da Transformada de Laplace às mesmas. A Transformada de Laplace consiste na conversão de funções comuns em funções de uma variável complexa  $s$  para efetuar a resolução de equações diferenciais lineares. [15]

Seguidamente, determina-se a Função de Transferência, definida pelo quociente da transformada de Laplace da variável de entrada e da transformada de Laplace da variável de saída do sistema, do qual todas as condições iniciais envolvidas são nulas.

$$G(s) = \frac{\mathcal{L} \text{ saída}}{\mathcal{L} \text{ entrada}} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.2)$$

Finalmente, determina-se o modelo matemático que representa a resposta do sistema em função do tempo aplicando a inversa da transformada de Laplace à função da variável pretendida (2.2).

$$\mathcal{L}^{-1}[Y(s)] = \mathcal{L}^{-1}[G(s) \cdot X(s)] \quad (2.3)$$

O processo anteriormente descrito de modelação de um sistema automático de controlo pode ser resumido nos passos indicados na Figura 2.5.

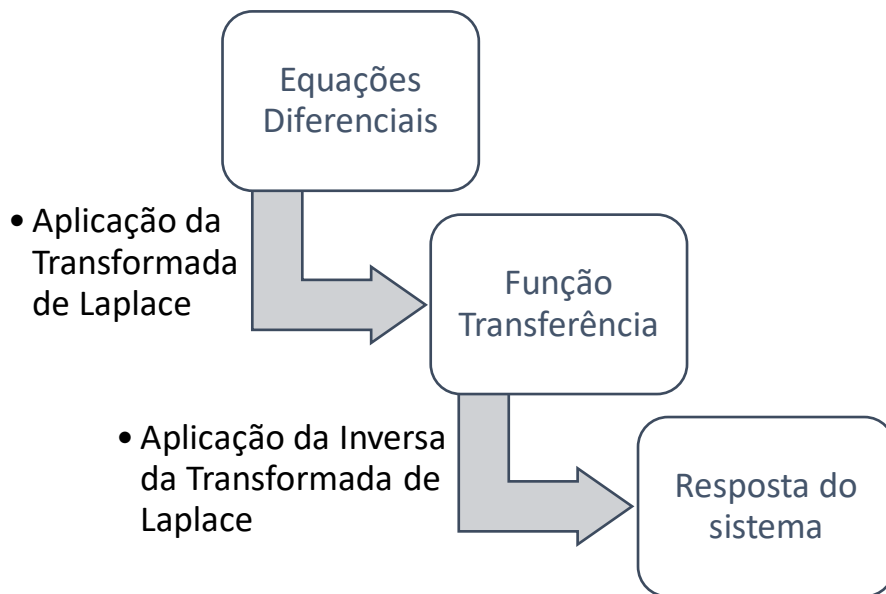


Figura 2.5 – Processo de modelação de um sistema de controlo automático

Principais propriedades da Função de Transferência:

- É um modelo matemático com o objetivo de expressar a equação diferencial que relaciona a variável de entrada e a variável de saída;
- É uma propriedade intrínseca do sistema, independentemente da natureza e intensidade do sinal de entrada;
- Não fornece informações relativamente à estrutura física do sistema, logo para sistemas diferentes podem existir funções de transferência idênticas;
- Quando conhecida a função transferência, o comportamento do sistema pode ser estudado através da aplicação de diferentes sinais de entrada e da análise do sinal de saída.

Depois de determinado o modelo matemático do sistema, é importante a compreensão e análise do desempenho do sistema. A resposta temporal de um sistema de controlo consiste em duas partes, a resposta transitória e a resposta estacionária. A resposta transitória abrange o comportamento desde o estado inicial até ao estado final, enquanto a resposta estacionária corresponde ao comportamento do sistema quando o tempo tende para infinito. [14]

A característica mais relevante do comportamento dinâmico de um sistema é a estabilidade absoluta, a qual distingue um sistema estável de um sistema instável. Um sistema de controlo considera-se em equilíbrio quando, na ausência de perturbações ou sinais de entrada, o sistema permanece no mesmo estado. Assim, pode dizer-se que um sistema quando submetido a uma condição inicial em que os valores do sinal de saída divergem sem limite é um sistema instável. Os sistemas de controlo lineares e invariantes no tempo podem ainda ser classificados em criticamente estável quando o sinal de saída apresenta oscilações que se conservam indefinidamente, ou em sistema estável quando o sinal de saída retoma ao estado de equilíbrio se o sistema for submetido a uma condição inicial.

Um método geralmente utilizado para determinar a estabilidade absoluta de um sistema de controlo em anel fechado, é o critério de estabilidade de Routh, o qual permite conhecer se as raízes de uma equação polinomial são instáveis sem ser necessário resolver a equação. [14]

Geralmente, na teoria de controlo são abordadas as dinâmicas dos sistemas mais comuns, sistemas de primeira ordem e sistemas de segunda ordem. Para compreender as suas dinâmicas são analisadas as respostas dos sistemas a um degrau unitário, isto é, uma variável de entrada no sistema de valor constante.

No caso de um sistema de primeira ordem submetido a um degrau unitário, a sua resposta pode ser expressa pela função transferência da equação 2.4, onde  $k$  representa o ganho do sistema e  $T$  a constante de tempo.

$$G(s) = \frac{k}{Ts + 1} \quad (2.4)$$

Quanto maior o valor da constante de tempo, mais lenta será a dinâmica do sistema e quanto maior o valor de ganho maior será a amplitude da resposta do sistema. A resposta de um sistema dinâmico de primeira ordem encontra-se representado na Figura 2.6.

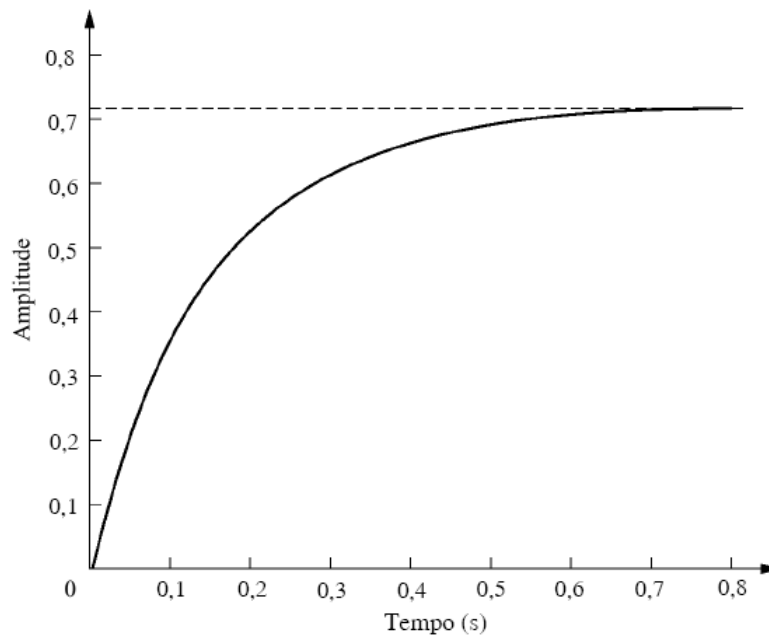


Figura 2.6 – Resposta de um sistema dinâmico de primeira ordem

No caso dos sistemas dinâmicos de segunda ordem, a sua resposta depende da frequência natural não amortecida ( $\omega_n^2$ ) e do coeficiente de amortecimento ( $\zeta$ ), como se apresenta na equação 2.5.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.5)$$

Estes sistemas podem ser classificados em sistema subamortecido, sistema sobreamortecido e sistema criticamente amortecido, respetivamente quando o coeficiente de amortecimento é menor, maior e igual a 1. Na Figura 2.7, encontra-se representada a resposta de um sistema dinâmico de segunda ordem para diferentes valores do coeficiente de amortecimento onde, para valores deste coeficiente inferiores a 1 a resposta apresenta oscilações, para valores superiores a 1 uma resposta sem oscilações, e quando igual a 1 as oscilações no sistema são mínimas ou quase nulas.

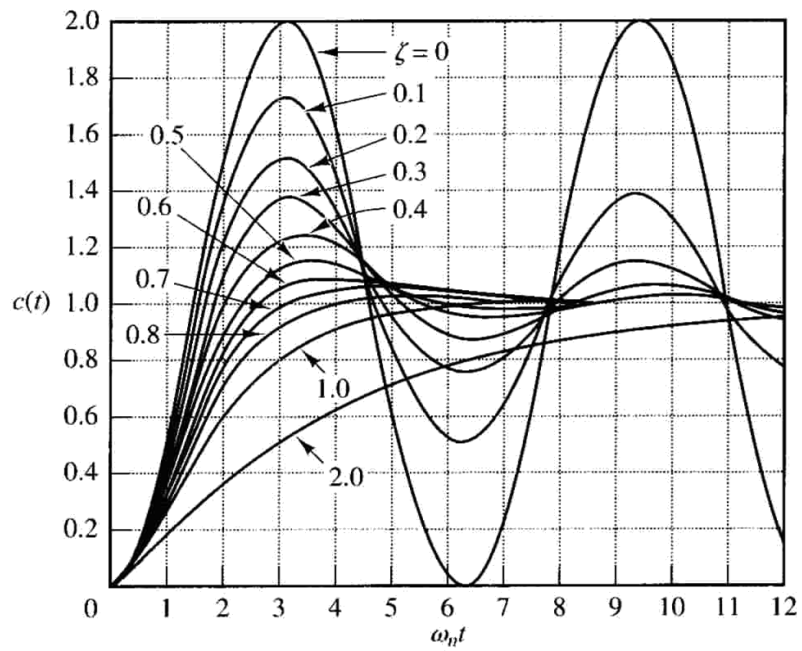


Figura 2.7 – Resposta de um sistema dinâmico de segunda ordem para diferentes valores do coeficiente de amortecimento [14]

Exemplos de outros métodos de análise da resposta de um sistema em anel fechado, através da sua função de transferência, são o método do lugar geométrico das raízes também conhecido por LGR, e o diagrama de Bode. [14]

## 2.2. Controladores industriais

A função dos controladores é fornecer uma ou mais ações de controlo sobre o sistema, com base no seu objetivo e utilizando a informação disponibilizada pelo sinal de entrada. Hoje em dia, os controladores são utilizados frequentemente a nível industrial com o principal objetivo de obter sistemas mais eficientes através da sua maior automatização.

O primeiro controlador desenvolvido, foi o controlador On/Off, que tal como o nome indica, consiste em ligar ou desligar um equipamento consoante as condições pretendidas, por isso, para além de ter sido o primeiro método de controlo é também o mais simples. Segundo McDowall *et al*, 2008 [16] este método pode ser designado por “Two-position control” (controlo de duas posições) que pode ser aplicado em sistemas com apenas dois estados, como, por exemplo, uma válvula que pode estar na posição aberta ou fechada, sem controlo da percentagem de abertura da válvula, ou um ventilador que pode estar ligado ou desligado, sem o controlo da velocidade de rotação do mesmo.

A classificação dos controladores industriais mais comuns é feita de acordo com as ações de controlo a que se destinam, pelo que os controladores podem ser dos seguintes tipos: On/Off, proporcional (P), integral (I), derivativo (D), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral-derivativo (PID).

No caso do controlador proporcional, matematicamente consiste no produto entre o erro obtido no controlo em anel fechado e uma constante designada por ganho proporcional do controlador ( $k_p$ ). Com o uso deste controlador e ajustando o seu ganho proporcional consegue-se melhorar a rapidez da resposta do sistema, isto é, maior rapidez em atingir valores próximos do valor de *setpoint*. Apesar da maior rapidez de resposta do sistema, só com ação proporcional não é possível eliminar o erro em regime estacionário, significando isto que ao ser atingido o valor mais aproximado do valor de *setpoint* irá existir sempre um erro associado, designado por erro em regime estacionário.

$$u(t) = k_p \cdot e(t) \quad (2.4)$$

Quando apenas há ação integral, ou seja, com um controlador integral, o sistema leva mais tempo a atingir o regime estacionário comparativamente, com o controlador proporcional, mas contrariamente ao controlador proporcional, a ação integral permite

eliminar o erro em regime estacionário. Neste caso, o valor da variável de saída é determinado matematicamente pela seguinte expressão.

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.5)$$

Quanto aos controladores derivativos, estes não devem ser aplicados isoladamente porque a ação derivativa, particularmente, só reage em períodos de transição, por exemplo, em alterações de valores de *setpoint*. A aplicação desta ação melhora a resposta do controlador através da antecipação do erro, o que se deve à sua expressão matemática em que o ganho derivativo encontra-se em função da velocidade do erro.

$$u(t) = k_d \frac{d e(t)}{d t} \quad (2.6)$$

Os controladores PI, fazem a adição das vantagens da ação proporcional e da ação integral, obtendo-se assim sistemas que atingem um regime estacionário em menor tempo e eliminam o erro associado a este regime.

Na presença de controladores PD, a ação derivativa permite o aumento do ganho proporcional devido à sua rápida resposta a variações no sistema, e conseqüentemente atinge-se um regime estacionário em menos tempo e um sistema mais estável.

Quando se aplica no mesmo controlador uma ação proporcional, uma ação integral e uma ação derivativa, é possível obter um sistema com as vantagens das diferentes ações de controlo, isto é, um sistema mais estável, com uma resposta a perturbações e a atingir o regime estacionário mais rapidamente, e ainda a eliminação do erro estacionário. No entanto, o sistema só atinge o seu estado ideal se for efetuado o ajuste dos parâmetros de controlo ( $k_p, T_i, T_d$ ), o qual pode ser efetuado através das regras de Ziegler-Nichols.

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d e(t)}{d t} \quad (2.7)$$

## 2.3. Acerto de parâmetros de controladores

O ajuste dos parâmetros dos controladores industriais pode ser efetuado através de diferentes métodos, no entanto hoje em dia métodos frequentemente aplicados são manualmente por tentativa e erro ou analiticamente segundo as Regras de Ziegler-Nichols. No caso de aplicação manual o processo inicia-se com todos os parâmetros iguais a zero e posteriormente aumenta-se individualmente cada parâmetro, ganho proporcional, ganho integral e ganho derivativo, por esta mesma ordem, observando-se o comportamento do sistema em cada alteração até se obter o melhor comportamento do sistema. Embora, através deste método, seja possível obter um comportamento aproximado do desejado, persiste a dificuldade de determinar os valores ideais para os parâmetros do controlador, por isso, recorre-se a métodos analíticos.

Relativamente aos métodos analíticos de acerto de parâmetros dos controladores, podem ser aplicados tanto para controlo em anel aberto como controlo em anel fechado, e são respetivamente o método da “resposta ao degrau” e o método  $K_{cr}$ .

No método da resposta ao degrau, para controlo em anel aberto, observa-se a resposta do sistema ao longo do tempo após uma perturbação, cujo resultado será uma curva semelhante à da Figura 2.8.

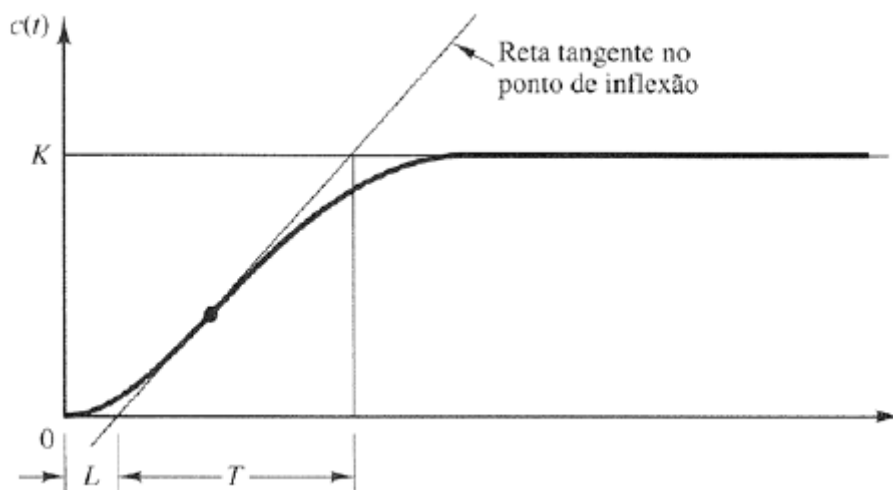


Figura 2.8 – Curva da resposta do sistema para aplicação do método da resposta em degrau

Tal como se pode observar, a curva é definida pelo tempo de atraso da resposta e por uma constante de tempo determinados pela interseção da reta tangente à curva no ponto de inflexão com o eixo do tempo, cujas representações na figura anterior são, respetivamente,  $L$  e  $T$ . Posteriormente, recorrendo à Tabela 2.1, determina-se os parâmetros de controlo consoante o tipo de controlador pretendido.

Tabela 2.1 – Acerto de parâmetros segundo o método da resposta ao degrau

	$kp$	$Ti$	$Td$
$P$	$T/L$	$\infty$	$0$
$PI$	$0.9 \cdot (T/L)$	$L/0.3$	$0$
$PID$	$1.2 \cdot (T/L)$	$2 \cdot L$	$0.5 \cdot L$

O método  $K_{cr}$ , aplicado em sistemas de controlo em anel fechado, consiste em primeiro lugar em obter o valor de ganho proporcional crítico ( $K_{cr}$ ), para tal, o sistema tem de ser colocado sob perturbações e seguidamente calcula-se o respetivo tempo decorrido, designado por período crítico ( $P_{cr}$ ) e por fim determinam-se os parâmetros do controlador utilizado no sistema recorrendo à Tabela 2.2

Tabela 2.2 – Acerto de parâmetros segundo o método  $K_{cr}$

	$kp$	$Ti$	$Td$
$P$	$0.5 \cdot K_{cr}$	$\infty$	$0$
$PI$	$0.45 \cdot K_{cr}$	$(1/1.2) \cdot P_{cr}$	$0$
$PID$	$0.6 \cdot K_{cr}$	$0.5 \cdot P_{cr}$	$0.125 \cdot P_{cr}$

Tal como anteriormente referido, existem diferentes métodos da análise da resposta de um sistema em anel fechado (LGR, diagrama de bode, entre outros), através dos quais também é possível determinar o acerto dos parâmetros PID.

## 2.4. Sistemas de controlo em equipamentos industriais, controladores e autómatos

Após a introdução dos conceitos essenciais de controlo, segue-se a abordagem dos tipos de controlo em equipamentos industriais para os sistemas mais aplicados (pneumáticos, hidráulicos, elétricos e eletrónicos), os controladores e os autómatos.

Os sistemas pneumáticos e hidráulicos apresentam um fluido na sua constituição como meio de transmissão de sinais e potência. Relativamente aos sistemas pneumáticos o fluido aplicado é o ar ou determinados gases, sendo estes extensivamente aplicados em automação de equipamentos de produção e na área de controladores automáticos, devido à simplicidade e facilidade de manutenção. Todavia, estes não são adequados na aplicação em controlo de equipamentos que envolvam grandes massas sob forças de cargas externas, como por exemplo no controlo de aviões, recorrendo-se nestes casos a sistemas hidráulicos no qual o meio de transmissão é óleo. [14]

Sistemas elétricos com alimentação de 24 Volts (V) e corrente alternada (AC), são geralmente controlados pela abertura ou fecho de contactos e variações de resistência elétrica. Os exemplos de componentes mais utilizados nestes sistemas são os sensores e atuadores elétricos. Contrariamente, os sistemas eletrónicos realizam o controlo de lógica através de componentes semicondutores analógicos (díodos, LED's, transístores, etc.), ou seja, operam com variações de corrente e tensão, expressos em miliamperes (mA) e volts (V), respetivamente. [14]

No entanto, existe também a possibilidade de combinar tipos de sistemas distintos, com a finalidade de obter as vantagens da aplicação de cada sistema isolado num único sistema, tendo em conta que o principal objetivo dos sistemas de controlo em equipamentos industriais é obter um controlo automático de um determinado sistema (automação).

A automação tem duas vertentes, automação cablada ou automação programada. O que as diferencia é a forma de ligação dos componentes do sistema, sendo a automação cablada definida por uma configuração de ligações físicas entre os diferentes componentes (através de botões, temporizadores, relés, etc) de modo a obter o comportamento desejado. Por outro lado, a automação programada, requer a ligação de

todos os componentes do sistema a um autômato programável (também conhecido por PLC – Programmable Logic Controller), cuja programação pode ser armazenada na sua memória e conseqüentemente efetuar automaticamente o controle do sistema [17]. A Figura 2.9 apresenta exemplos de autômatos programáveis.

Nos dias de hoje, a automação programada tem sido cada vez mais aplicada e substituído a automação cablada, principalmente devido às seguintes vantagens:

- flexibilidade de aplicação,
- não necessidade de modificar as ligações após a sua montagem,
- possibilidade de utilização de vários tipos de controle,
- operações de computação avançada,
- comunicação entre diferentes sistemas.



Figura 2.9 – Autômatos programáveis da Delta Electronics, Inc. [18]

A estrutura de um PLC é essencialmente constituída por uma Unidade Central de Processamento (CPU), cuja função é processar as instruções armazenadas em memória, por módulos de entradas e de saídas também designados, respetivamente, por inputs e outputs, e ainda por uma fonte de alimentação (Figura 2.10).

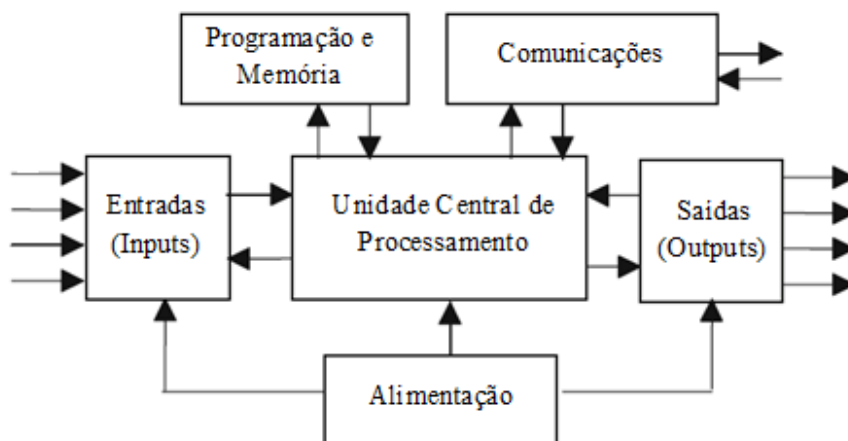


Figura 2.10 – Estrutura de um autômato programável (ou PLC)

Tal como anteriormente referido, estes autômatos têm a vantagem de possibilitar a comunicação com sistemas de gestão, monitorização e controlo, mas em contrapartida obrigam a seguir um protocolo de comunicação. Os protocolos de comunicação mais associados às redes de comunicação na indústria são BACnet (ISO 16484-5), LonWorks (ISO 14908-1), Modbus (*International de facto standard*), Profibus (IEC 61158) e KNX (ISO.14543-3). [19]

As linguagens de programação aplicáveis em autômatos programáveis são baseadas na norma *IEC 61131-3: Programmable Controllers Part 3: Programming Languages*, com o objetivo de criar um padrão internacional. Os diferentes tipos de linguagens de programação referidos anteriormente podem ser:

- Digrama de Contactos (LD ou LAD)
- Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC)
- Diagrama de Blocos Funcionais (FBD)
- Texto Estruturado (ST)
- Lista de Instruções (IL ou STL)

As linguagens LAD, SFC e FBD são definidas através de simbologia gráfica. No caso da linguagem LAD, a disposição gráfica das entradas e saídas é baseada no princípio de contactos elétricos, permitindo a mesma verificar se os contactos de entrada conduzem à passagem de sinal até aos contactos das saídas, tal como no exemplo da Figura 2.11 a

saída *Out 1* apenas é acionada quando se verificar simultaneamente que os contactos A, B e C estão fechados ou então que os contactos A e C estão fechados e em simultâneo o contacto D está aberto.

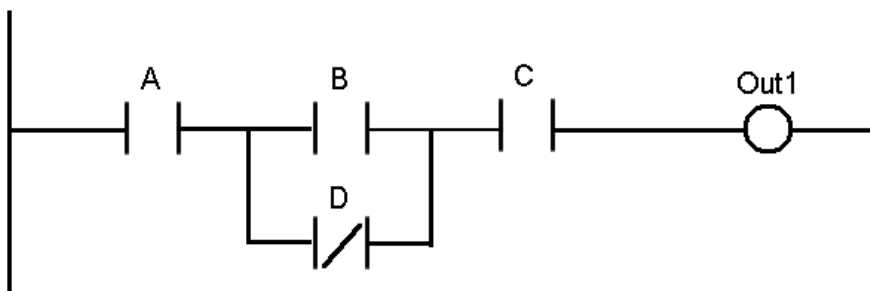


Figura 2.11 - Exemplo de Linguagem LAD

Apesar da linguagem LAD ser a mais aplicada nos autómatos programáveis, a linguagem de Diagrama de Blocos Funcionais (FBD) é também uma linguagem de programação frequentemente utilizada na indústria. Em linguagem FBD as funções lógicas são representadas por blocos com ligações para entradas e saídas; no exemplo da Figura 2.12, constituído por dois blocos de funções lógicas diferentes, no qual a saída *Out1* só é verdadeira quando a saída do bloco “&” ou a entrada C são verdadeiras, pelo que a saída do primeiro bloco “&” só é verdadeira quando na presença do sinal de entrada A e na ausência do sinal B.

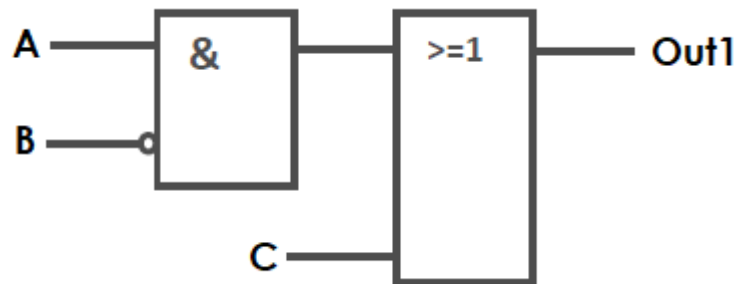


Figura 2.12 – Exemplo Linguagem FBD

A Linguagem SFC, como o seu nome sugere é constituído por uma sequência de etapas separadas por transições, sendo cada etapa definida por uma ou mais ações e cada transição definida por uma ou mais condições. Contudo, a cada etapa sucede uma transição e vice-versa, apenas quando é finalizada a etapa e verificada a transição (ver exemplo Figura 2.13)

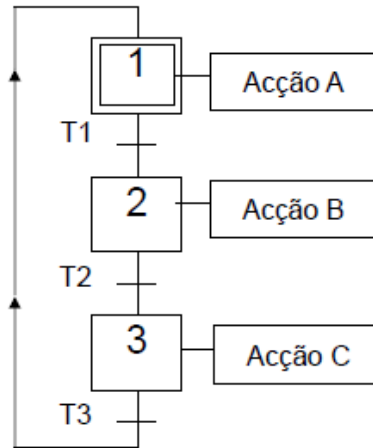


Figura 2.13 – Exemplo de Linguagem SFC

Quanto às linguagens ST e IL, não se definem por simbologia gráfica, mas sim por linhas de código ou de instruções (conforme exemplos na Figura 2.14), e geralmente aplicam-se em sistemas de elevada complexidade por simplificar e compactar a programação comparativamente com uma linguagem gráfica.

```

1
2 // IF #inVar = true
3 // THEN
4 //   #startDrive := true;
5 // ELSE
6 //   #startDrive := false;
7 //   #memVar1 := true;
8 // END_IF;
9
10 IF #stopVar = TRUE
11 THEN
12   #startDrive := false;
13 ELSE
14   #memVar2 := true;
15   #outVar := false;
16 END_IF;
  
```

Rel	Addr.	Operation	Operand
000		AN	I 2.0
002		A	I 2.1
004		A	I 2.2
006		=	Q 4.0
008		A	I 2.3
00A		A	I 2.4
00C		O	
00E		A	I 2.5
010		AN	I 2.6
012		=	Q 4.1
014		BE	

Figura 2.14 – Exemplos de Linguagem ST (esquerda) e IL (direita)



## Capítulo 3. Unidades de Tratamento de Ar

### 3.1. Conceitos básicos

Apresenta-se uma breve descrição da constituição de uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) e do tipo de serviço que este equipamento pode realizar.

Uma UTA é o equipamento responsável por conduzir o ar do espaço a climatizar para o exterior e/ou conduzir o ar novo proveniente do exterior para o espaço que se pretende climatizar, como no exemplo que se apresenta na Figura 3.1. O ar conduzido por este equipamento, atravessa diversos módulos que o constituem cujos componentes têm diferentes funções, as quais incluem o condicionamento e o tratamento do ar, com o fim de se obterem as condições desejadas para um determinado espaço.

Geralmente, tais equipamentos são utilizados em sistemas de AVAC, cujo objetivo principal é o controlo de temperatura e humidade do espaço pretendido, eliminar impurezas e partículas contaminantes do ar interior, e também a renovação do ar através da introdução de ar novo.

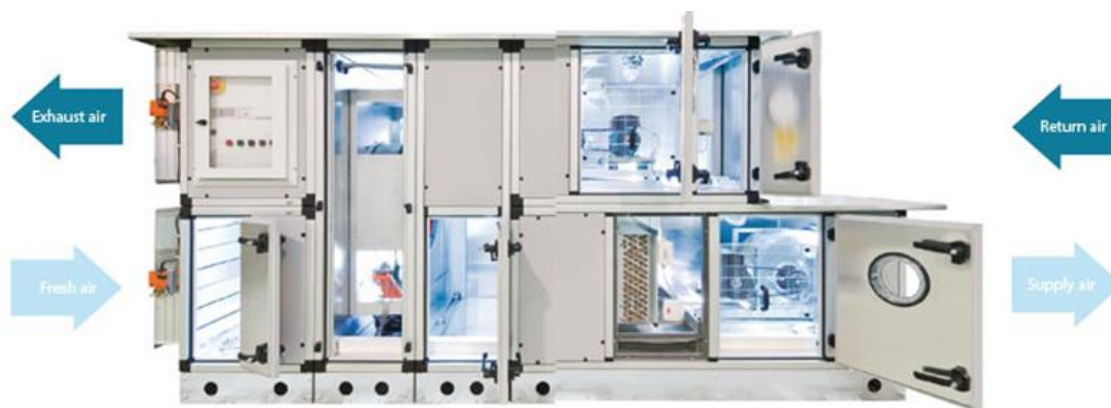


Figura 3.1 – Ilustração da circulação de ar numa UTA da marca Daikin

Tendo em conta as diferentes condições exigidas pelos clientes para climatizar diferentes espaços, a generalização destes sistemas torna-se uma tarefa difícil e como tal é necessário, na fase de projeto, projetar e dimensionar individualmente cada UTA, e respetivos componentes, de modo a obter as condições pretendidas.

## 3.2. Componentes essenciais

Descreve-se agora o funcionamento e as principais características dos componentes da UTA em estudo (capítulo 4), bem como de outros componentes frequentemente aplicados em módulos de UTAs, tais como:

- Ventiladores
- Registos de caudal
- Recuperadores de calor
- Baterias de aquecimento/arrefecimento
- Compressores
- Humidificadores
- Caixas de mistura
- Filtros de ar

### 3.2.1. Ventiladores

Os ventiladores, numa UTA, têm como principal função controlar a circulação do ar, para tal, o seu funcionamento consiste na rotação de pás através da energia fornecida por um motor elétrico, resultando então na deslocação de uma quantidade de massa de ar por unidade de tempo; esta variável física designa-se caudal de ar, geralmente expressa em metros cúbicos por hora ( $m^3/h$ ) ou em litros por segundo (l/s). Em consequência das forças mecânicas aplicadas no ar, gera-se um diferencial de pressão entre a montante e a jusante do fluxo de ar.

Para um mesmo ventilador, quanto maior a velocidade de rotação das pás, maior será o caudal de ar, logo pode dizer-se que através destes componentes é possível controlar os caudais de entrada ou saída de ar na UTA.

Em sistemas de AVAC aplicam-se geralmente ventiladores centrífugos ou axiais, sendo a principal diferença entre estes a direção do fluxo de ar; esta diferença condiciona o

diferencial de pressão, o caudal e a eficiência energética do ventilador. O tipo de ventilador mais comum para aplicação em UTA é o ventilador centrífugo (a Fig.3.2 apresenta um exemplo), uma vez que apresenta melhor eficiência e menor ruído, comparativamente com ventiladores axiais. [20]



Figura 3.2 – Ventilador centrífugo ZIEHL-ABEGG modelo CPro [21]

A seleção do modelo de ventilador (dimensões, velocidade máxima, potência, factor K, etc.) a aplicar numa UTA, depende das condições de serviço exigidas, como por exemplo o caudal ou a pressão.

### 3.2.2. Registos de caudal

Registos de caudal, ou simplesmente registos, são os componentes responsáveis pela regulação do ar na entrada e saída da UTA cuja circulação é produzida pelos ventiladores; são constituídos, geralmente, por um conjunto de lâminas, em aço galvanizado, que podem ser controladas manualmente ou automaticamente através de um atuador elétrico (conforme indicado na Figura 3.3). A variação da abertura das pás dos registos (desde totalmente aberto até totalmente fechado) alteram a pressão no interior dos módulos para um mesmo caudal de ar.

As especificações destes componentes estão descritas na norma EN 1751:2014 (“Ventilação para edifícios – Dispositivos terminais de ar - Testes aerodinâmicos de

registos e válvulas”)[22], que indica os valores limites a cumprir em ensaios de estanquicidade.



Figura 3.3 - Registo de caudal: manual (esquerda); com atuador elétrico (direita) [23]

### 3.2.3. Recuperadores de calor

Os recuperadores de calor são componentes que efetuam a permuta de calor, cujo principal objetivo é aproveitar parte da energia do ar de retorno para aquecer/arrefecer o ar novo e obter assim menores consumos de energia, processo este também designado por reaproveitamento de energia térmica.

O funcionamento destes componentes consiste na passagem do ar de retorno e do ar novo em direções e/ou sentidos distintos, mas ambos passando por um conjunto de alhetas de alumínio, ou de outro material com boa condutividade térmica, que permitem assim a permuta térmica entre os dois fluxos.

Os recuperadores de calor podem ser do tipo rotativo ou de placas (Figura 3.4), sendo os primeiros os mais utilizados devido à sua elevada eficiência, que pode atingir 90%.

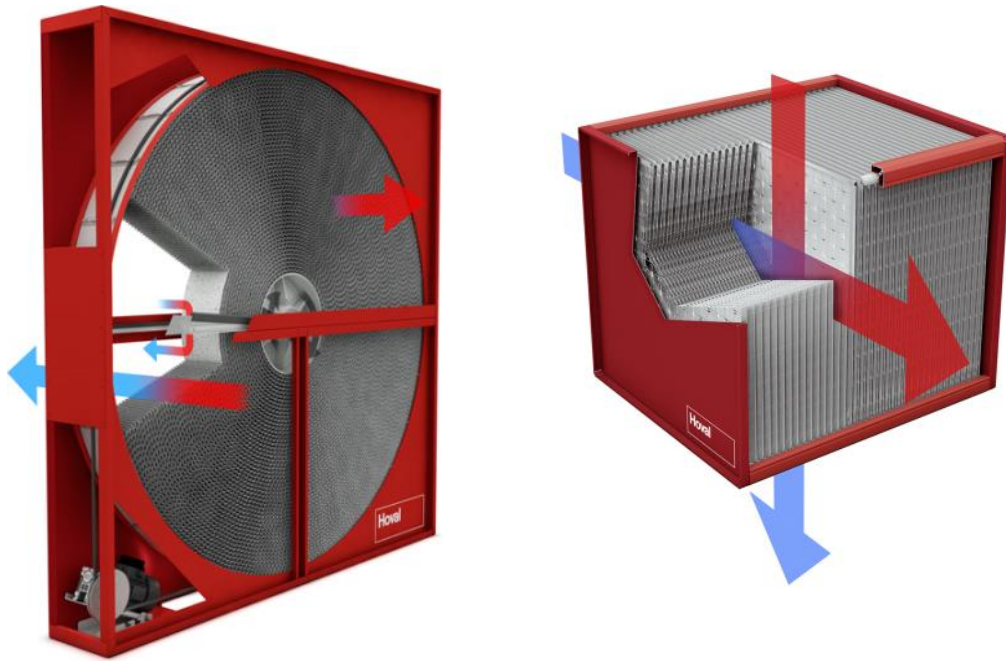


Figura 3.4 – Recuperadores de calor do tipo: rotativo (esquerda)[24]; placas (direita) [25]

### 3.2.4. Baterias de Aquecimento/Arrefecimento

Assim como os recuperadores de calor, as baterias de aquecimento ou arrefecimento são componentes que também realizam a permuta de calor. Nas baterias de aquecimento ou arrefecimento a permuta é realizada entre o ar circulante da UTA e o fluído circulante nas serpentinas deste componente, as quais são compostas por um material de boa condutividade térmica. A cada bateria de aquecimento/arrefecimento encontra-se associado um tabuleiro de condensados (gotículas de água) devidamente dimensionado com o objetivo de impedir que os condensados se desloquem juntamente com o ar ventilado na UTA o que poderia danificar os restantes componentes.

As baterias classificam-se então, de acordo com o fluído utilizado, em baterias de aquecimento ou arrefecimento a água, baterias de expansão direta (também designadas por baterias DX) e baterias a vapor (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Bateria a vapor (esquerda); Bateria de aquecimento/arrefecimento a água (centro); Bateria de expansão direta (direita)

Sendo necessária a alimentação destes componentes, torna-se indispensável a adição de outro equipamento para fornecer o fluido circulante no interior das serpentinas da bateria. Como exemplos, associa-se por exemplo, à bateria a vapor, à bateria de arrefecimento a água e à bateria de expansão direta, respetivamente, um gerador de vapor, um “chiller” e um compressor.

Uma vez que a eficiência da bateria depende do fluido circulante nas serpentinas, a escolha do mesmo é efetuada em função das condições pretendidas. Na Figura 3.6 apresentam-se os resultados de um estudo [28] relativamente aos fluidos primários e secundários mais utilizados na climatização de instalações da indústria nacional de produtos alimentares.

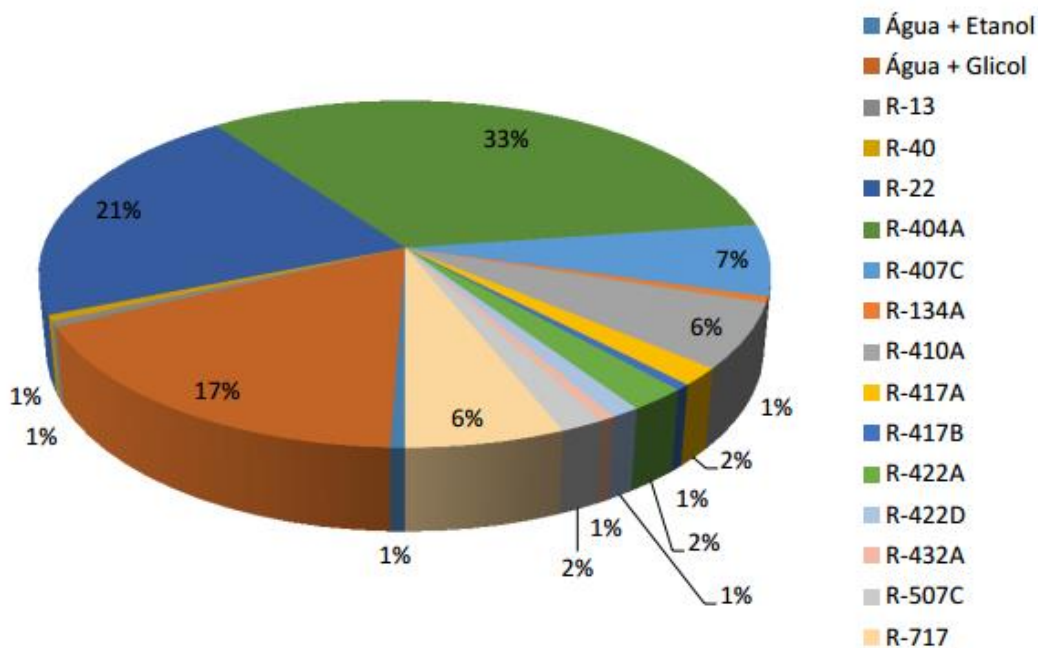


Figura 3.6 – Fluidos primários e secundários mais utilizados na indústria nacional de produtos alimentares[26]

### 3.2.5. Compressores

Os compressores são aplicados em sistemas de AVAC quando é necessário um aumento de pressão, e conseqüente aumento de temperatura do fluido, como por exemplo para alimentação de uma bateria de aquecimento ou arrefecimento. Atualmente, existem diversos tipos de compressores para sistemas de AVAC, os mais usuais são os compressores alternativos, de parafuso, centrífugos e de espiral. A compressão efetuada depende exclusivamente do tipo de compressor, ou seja, do tipo de funcionamento mecânico, e do modelo de compressor.

Numa UTA, a aplicação de compressores para alimentação de baterias de aquecimento ou arrefecimento, geralmente é efetuada no exterior desta, embora no caso de um sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, o compressor instala-se no interior da UTA, em circuito fechado com o respetivo evaporador (bateria de arrefecimento) e condensador (bateria de aquecimento) para efetuar o ciclo de gás (descrito no capítulo 4.2).

De acordo com Liegeois e Winandy [27], o tipo de compressor mais eficiente e por consequência mais utilizado em UTAs com sistema de aquecimento ou arrefecimento integrado é o compressor em espiral também designado por compressor *scroll*. Nestes compressores a compressão ocorre entre duas espirais, uma espiral fixa e outra espiral oscilatória; O fluido a comprimir passa pela entrada para o interior das espirais, momento a partir do qual começa a ser comprimido continuamente, devido ao movimento da espiral oscilatória até o fluido chegar à saída das espirais (Figura 3.7).

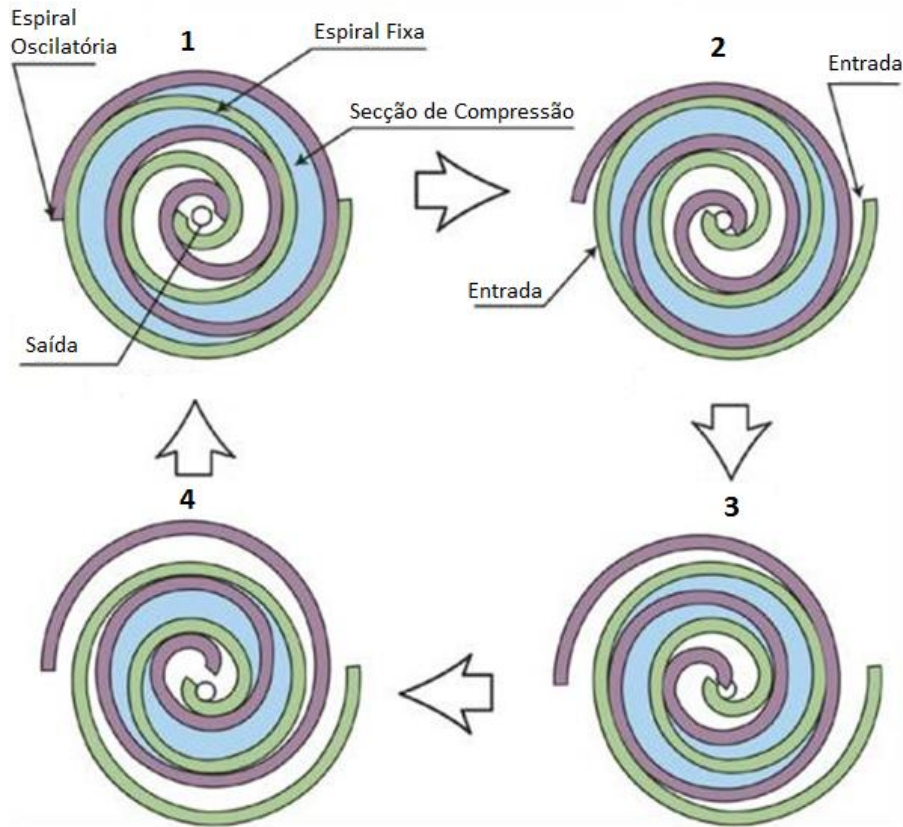


Figura 3.7 – Compressão em espiral

### 3.2.6. Humidificadores

O objetivo principal da aplicação de humidificadores numa UTA é, tal como o nome sugere, regular o conteúdo de vapor de água no ar. Os humidificadores podem ser distinguidos de acordo com o seu modo de adição de humidade no ar [20]:

- Humidificador a vapor (Fig.3.8) - acrescenta vapor de água ao caudal de ar, com diferenças de temperatura insignificantes entre estes, sendo por isso considerado como um processo isotérmico.
- Humidificador de saturação adiabática - acrescenta água no estado líquido ao caudal de ar o qual irá fornecer energia para ocorrer a evaporação da água, este é considerado um processo adiabático devido à permuta de calor com o exterior ser desprezável.



Figura 3.8 – Exemplo de Humidificador a vapor

O resultado da aplicação destes componentes num equipamento de climatização é o aumento da humidade, como tal este componente pode ser dispensado caso os valores de humidade não sejam preocupação do utilizador.

### 3.2.7. Caixa de mistura

Quando se pretende que ocorra a mistura do caudal de ar de retorno com o caudal de ar novo como no exemplo da Figura 3.9, é aplicada uma caixa de mistura como um dos módulos da UTA. Assim, obtém-se uma mistura dos dois caudais em que a percentagem de caudal de ar novo e de ar de retorno a entrar na caixa de mistura poderá ser controlada pela abertura dos registos de caudal.

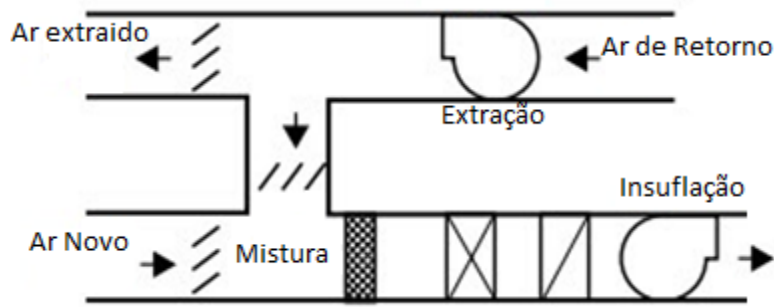


Figura 3.9 – Circulação do ar no interior de uma UTA com caixa de mistura

Uma caixa de mistura pode ser classificada em três tipos consoante a orientação dos fluxos de ar novo e de ar de retorno. Na Figura 3.10 apresentam-se os diferentes tipos de caixa de mistura: fluxos de ar paralelos, fluxos de ar opostos e fluxos de ar a 90°. Estes últimos são os mais utilizados porque apresentam a configuração mais favorável para se obter uma boa mistura. [20]

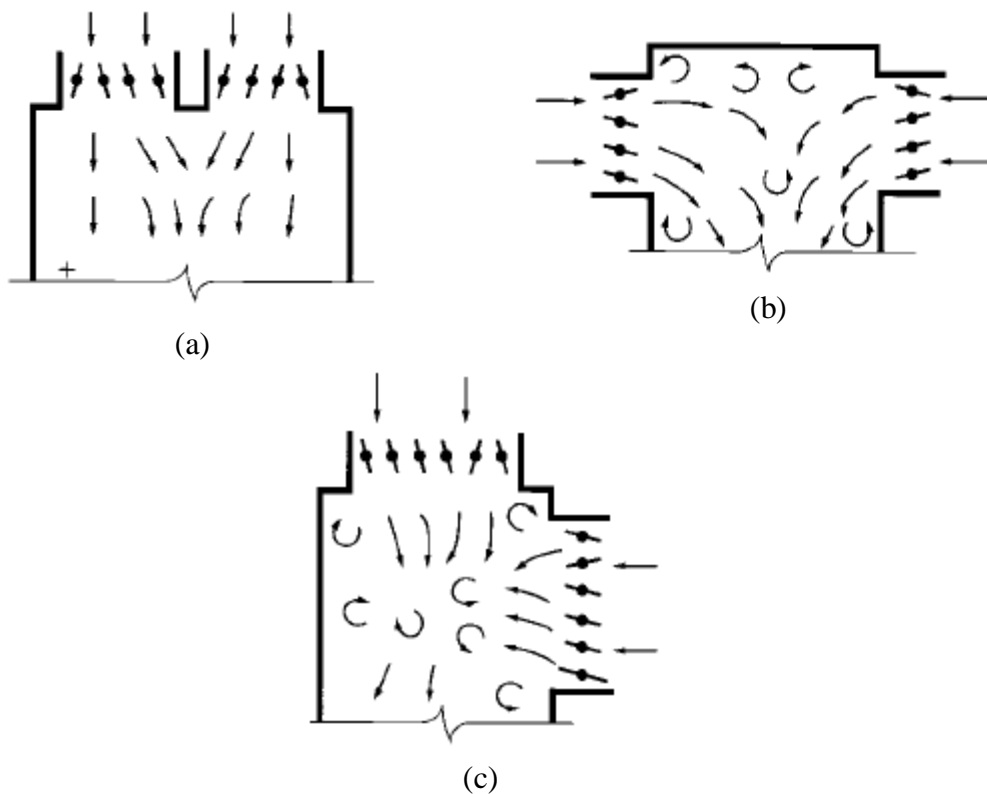


Figura 3.10 – Tipos de caixa de mistura: fluxos de ar paralelos (a), fluxos de ar opostos (b), fluxos de ar a 90° (c).

### 3.2.8. Filtros de ar

A função dos filtros numa unidade de tratamento de ar é a retenção de impurezas contidas no ar quer estas se encontrem no estado líquido, sólido ou gasoso. Normalmente, os filtros de ar aplicam-se próximo das entradas de ar novo e de ar de retorno, antes da circulação do ar pelos restantes componentes.

De modo a satisfazer os requisitos de filtragem exigidos pelo utilizador, seleccionam-se os filtros pretendidos através da Tabela 3.1, baseada na norma EN 779:2012 (“Filtros de partículas de ar para ventilação geral”) [28], ou através da Tabela 3.2 baseada na norma EN 1822:2009 (“Filtros de ar de elevada eficiência (EPA, HEPA e ULPA)”) [29].

Tabela 3.1 – Classificação de filtros baseada na norma EN 779:2012 [28]

	Classe de Filtro	Retenção média para poeira sintética (%)	Eficiência média para partículas de 0.4µm (%)
Partículas Grossas	G1	50 – 65	
	G2	65 – 80	
	G3	80 – 90	
	G4	> 90	
Partículas Médias	M5		40 – 60
	M6		60 – 80
Partículas Finas	F7		80 – 90
	F8		90 – 95
	F9		> 95

Os filtros de partículas grossas indicados na tabela anterior, geralmente são considerados como pré-filtros, uma vez que não eliminam as partículas mais “pequenas”, então a jusante destes são aplicados filtros para eliminação de partículas mais finas.

No caso de se pretender filtros com uma elevada eficiência, como por exemplo para aplicação a um sistema de AVAC de um hospital em que as condições de qualidade de ar interior têm de ser cuidadosamente controladas devem ser aplicados filtros de elevada eficiência tal como os apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Classificação de filtros de elevada eficiência baseada na norma EN 1822:2009 [29]

	Classe de Filtro	Eficiência média (%)
EPA – Filtro eficiente de partículas de ar	E 10	$\geq 85$
	E 11	$\geq 95$
	E 12	$\geq 99.5$
HEPA – Filtro de partículas de ar de eficiência elevada	H 13	$\geq 99.95$
	H 14	$\geq 99.995$
ULPA – Filtro de ar de ultra baixa penetração	U 15	$\geq 99.9995$
	U 16	$\geq 99.99995$
	U 17	$\geq 99.999995$

Além de se garantir as condições de conforto nos espaços climatizados por estes conjuntos de componentes referidos neste capítulo, consegue-se garantir a qualidade do ar interior, através da eliminação de partículas contaminantes do ar, quando utilizados filtros na UTA.

### 3.3. Estruturas de controlo. Tipo de controlo mais utilizado nestes elementos.

Ao longo dos anos, diferentes estruturas de controlo têm sido desenvolvidas para sistemas de AVAC com vista à melhoria da eficiência destes, como por exemplo: on/off, PID, fuzzy PID, adaptive fuzzy, neural networkbased, agent-based, predictive, robust, etc. Contudo, grande parte das estruturas de controlo desenvolvidas fazem parte de estudos a nível académico e que ainda não se encontram em aplicações reais.

As estruturas de controlo aplicadas na indústria são frequentemente controladores on/off e PID, principalmente devido ao seu baixo custo e à variedade disponível no mercado. Portanto, são estes os controladores que são mais utilizados em UTAs.

Apesar da elevada eficiência energética dos controladores aplicados isoladamente a cada equipamento de uma UTA, quando se procede ao controlo destes elementos, tem-se como principal objetivo atingir a melhor eficiência energética do seu conjunto de equipamentos. No entanto, sem uma inter-dependência entre os diferentes controladores, o resultado da eficiência energética de cada equipamento, não garante por si só a eficiência energética da UTA.

Por exemplo, uma UTA com controladores independentes para os ventiladores, para o recuperador de calor e para o sistema de aquecimento/arrefecimento, cujo objetivo é atingir uma determinada temperatura de insuflação, os equipamentos neste caso produzem trabalho simultaneamente para atingir os diferentes valores de *setpoint* definido para cada controlador. Como anteriormente referido, o problema deste tipo de estrutura de controlo, não permite obter a melhor eficiência da UTA. Para tal deve-se aplicar uma estrutura de controlo em que exista o controlo simultâneo e inter-dependente dos equipamentos, de modo a que os equipamentos produzam menos trabalho em momentos em que sejam dispensáveis para atingir o objetivo.



## Capítulo 4. Caso de Estudo

### 4.1. Constituição da Unidade de Tratamento de Ar

Como caso de estudo para esta dissertação foi utilizada a UTA com sistema de aquecimento e arrefecimento integrado, concebida e disponibilizada pela empresa Sandometal, Metalomecânica e Ar Condicionado, S.A. Os diversos componentes e a respetiva disposição nas várias secções desta UTA são apresentadas na Figura 4.1 (desenho da UTA apresentado no anexo A).

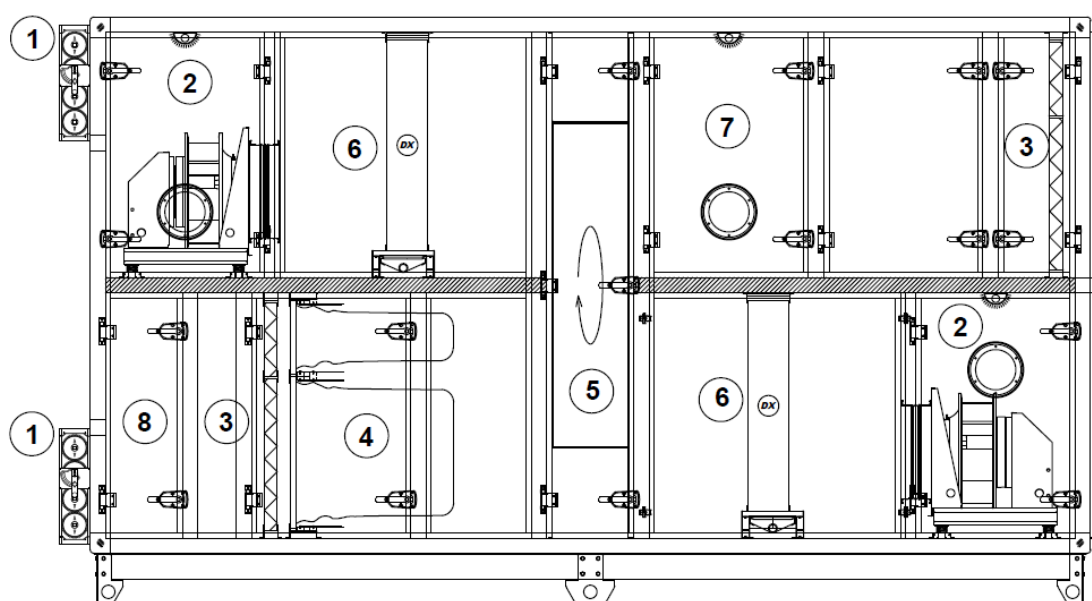


Figura 4.1 – Componentes da UTA utilizada como caso de estudo

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| 1 – Registos de caudal | 5 – Recuperador de Calor |
| 2 – Ventiladores       | 6 – Baterias DX          |
| 3 – Pré-Filtros        | 7 – Compressor           |
| 4 – Filtro             | 8 – Secção vazia         |

Os componentes presentes na UTA em estudo são os seguintes: dois registos de caudal com atuadores elétricos da Siemens (Figura 4.2), dois ventiladores da Ziehl-Abegg modelo Cpro-ECblue RH40C-ZID (Figura 4.3), dois pré-filtros G4 e um filtro F7 (Figura 4.4), um recuperador de calor rotativo da Enventus modelo ST1-N-W-1150-CS-V (Figura

4.5), e duas baterias DX alimentadas por gás R410A em circuito fechado com um compressor *scroll* da Sanyo (Figura 4.7).

A abertura e fecho dos registos de caudal é efetuado por atuadores elétricos da Siemens modelo GDB131.1E (Figura 4.2), o qual requer uma alimentação de 24V e um sinal de controlo fornecido pelo controlador para a abertura e outro para o fecho das pás dos registos. O ângulo de abertura das pás dos registos pode ser definido manualmente no atuador elétrico até um ângulo máximo de 90°, assim quando fornecido o sinal de abertura ao atuador este irá abrir as pás até atingir o mesmo.

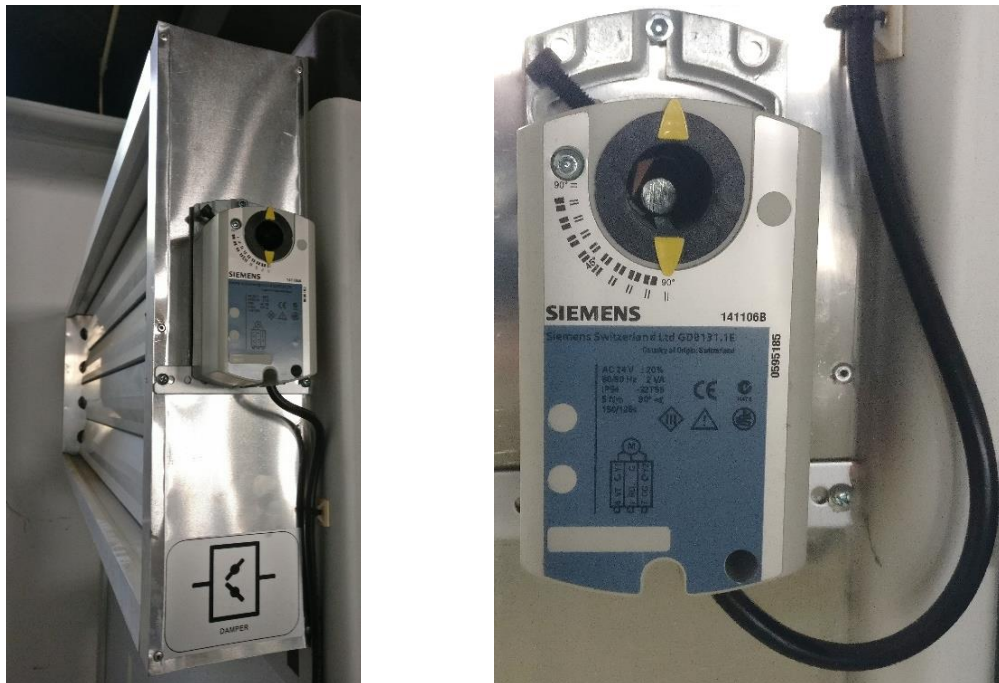


Figura 4.2 – Registos de caudal com atuador elétrico

Quanto aos ventiladores aplicados na UTA em estudo (Figura 4.3), como são o mesmo modelo apresentam as mesmas características. As principais características definidas pelo fornecedor [21] do motor elétrico de cada ventilador são: alimentação trifásica de 380-480V, frequência de 50/60 Hz (Hertz) e potência de 2,4 kW. O controlo dos ventiladores é realizado por um sinal digital para ligar/desligar o ventilador e um sinal analógico para controlar a velocidade de rotação do ventilador.

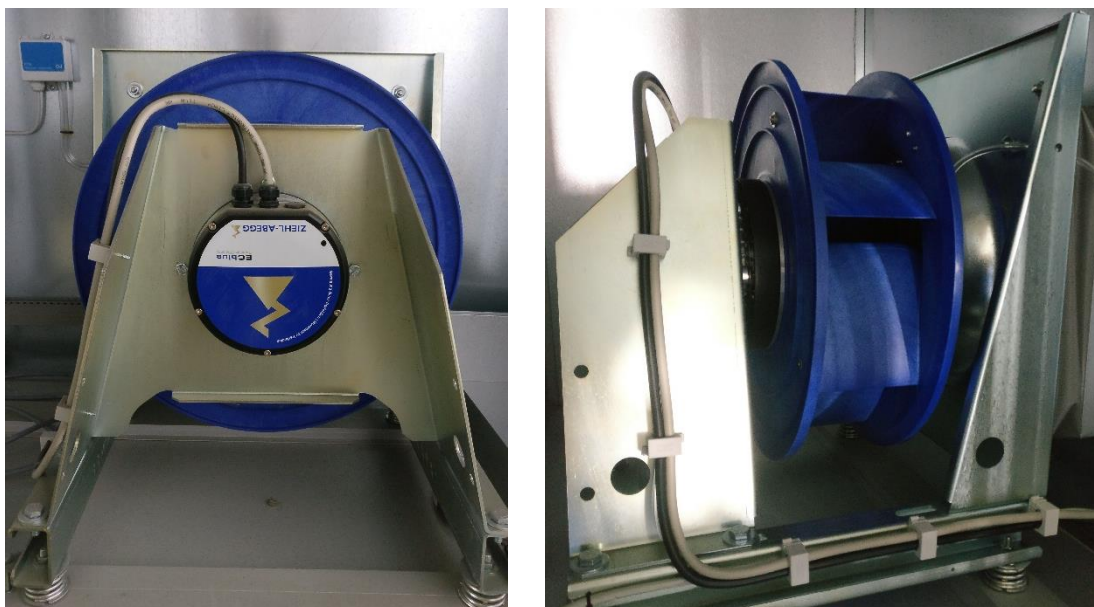


Figura 4.3 – Ventiladores Ziehl-Abegg modelo Cpro-ECblue RH40C-ZID

Relativamente aos filtros (Figura 4.4), não é necessário fornecer nenhuma ação de controlo porque apenas têm a função de filtrar as partículas contaminantes do ar circulante. No entanto, existe o controlo do diferencial de pressão em cada filtro, através de um sinal digital proveniente de um pressóstato associado a cada filtro, posteriormente descrito.



Figura 4.4 – Pré-filtros G4 (esquerda); Filtro F7 (direita)

No caso do recuperador de calor presente na UTA em estudo (Figura 4.5), é do tipo rotativo da marca Enventus [24], modelo ST1-N-W-1150-CS-V, cujo funcionamento é dependente de um motor elétrico de potência 0,09kW que por sua vez é controlado por um variador de frequência, concebidos pelo fornecedor.



Figura 4.5 – Recuperador de Calor rotativo da Enventus modelo ST1-N-W-1150-CS-V

O correto funcionamento do recuperador de calor, requer um sinal analógico fornecido ao variador de frequência (Figura 4.6) para se controlar a velocidade de rotação.



Figura 4.6 – Variador de frequência MicroMax-180 [24]

As baterias DX presentes na UTA, são componentes que pertencem ao circuito fechado do gás, juntamente com o compressor (Figura 4.7). Uma vez que as baterias não são componentes elétricos, não existe o controlo das mesmas, contudo existe o controlo do fluido que nelas circula através do controlo do compressor e restantes equipamentos (válvula de expansão e válvula de 4 vias) pertencentes ao sistema de aquecimento e arrefecimento.



Figura 4.7 – Bateria de aquecimento/arrefecimento (esquerda); Compressor (direita)

O controlo do compressor, assim como o controlo do recuperador de calor, é realizado através de um variador de frequência apropriado. O variador aplicado ao compressor é o Bonfiglioli – Agile 402-23-3-F-A apresentado na Figura 4.8, requer três sinais de controlo, dois sinais digitais para o ON/OFF do variador e um sinal analógico para controlar a frequência de trabalho do compressor.



Figura 4.8 – Variador de frequência do compressor

Posteriormente, segue-se a descrição do funcionamento dos restantes componentes presentes no ciclo frigorífico e respetivos métodos de controlo.

A abertura e fecho da válvula de expansão (Figura 4.9) é controlada por um sinal analógico, compreendido entre 0 e 10 Volt, fornecido pelo controlador. Quanto ao controlo da válvula de 4 vias (Figura 4.9) é efetuado através de um sinal digital, a qual apresenta uma posição de repouso quando na ausência deste sinal, e uma posição atuada que provoca a inversão do ciclo frigorífico quando na presença deste sinal.



Figura 4.9 – Válvula de expansão (esquerda); Válvula de 4 vias (direita)

Os dois sensores que estão presentes no ciclo (Figura 4.10), designados por sensor de baixa pressão e sensor de alta pressão, respetivamente localizados à entrada e saída de gás no compressor, apresentam um sinal de entrada analógica para leitura dos valores de pressão expressos em bar. Como os sensores são de modelos diferentes, QBE9002-P25U e QBE9002-P60U [30], as escalas de leitura estabelecidas pelo fornecedor são também diferentes, conduzindo a leituras de valores entre -1 e 24 bar para o sensor baixa pressão e valores entre -1 e 59 bar para o sensor de alta pressão.

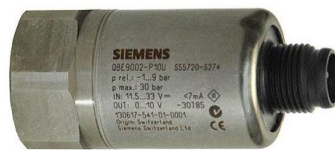


Figura 4.10 – Sensor de pressão Siemens QBE9002-P [30]

O circuito do gás, constituído pelos seguintes equipamentos anteriormente descritos: duas baterias DX, um compressor, uma válvula de expansão, uma válvula de 4 vias e dois sensores de pressão do gás à entrada e saída do compressor, encontra-se apresentado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Circuito do compressor

Com o objetivo de controlar e monitorizar as temperaturas na UTA utilizam-se sensores de temperatura posicionados à entrada de ar novo e de ar de retorno, e ainda à saída do ar de insuflação (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Sensor de Temperatura

Relativamente aos sensores de temperatura, estes têm o objetivo de fornecer ao controlador a informação da temperatura do ar no local onde estes se encontram. Os sensores de temperatura utilizados são do tipo RTD's Ni1000 (Níquel 1000), em que o valor de temperatura ( $t$ ) é determinado através da resistência  $R$  (expressa em Ohm) oferecida pelo sensor, conforme a equação 4.1, onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $F$  são constantes adimensionais e  $R_0$  corresponde à resistência do material utilizado a uma temperatura de  $0^\circ\text{C}$  [31].

$$R = R_0 \cdot [1 + At + Bt^2 + Ct^3 + Dt^4 + Et^5 + Ft^6] \quad (4.1)$$

$$\begin{array}{ll} A = 5.485 \times 10^{-3} & D = 2.805 \times 10^{-11} \\ B = 6.65 \times 10^{-6} & E = 0 \\ C = 0 & F = -2 \times 10^{-17} \end{array}$$

Ao longo da UTA encontram-se, também tomas de pressão posicionadas estrategicamente com o objetivo de controlar a pressão nos filtros e nos ventiladores. Assim, através de pressóstatos associados a uma toma de pressão a jusante e outra a montante de cada filtro existente é determinado pelo pressóstato o diferencial de pressão (Figura 4.13). Os pressóstatos têm a finalidade de estabelecer um limite no diferencial de pressão que quando atingido faz fechar um contacto, gerando assim um sinal digital de controlo.



Figura 4.13 – Toma de Pressão (esquerda); Pressóstato (direita)

Nesta aplicação, os pressóstatos têm o objetivo de alertar quando atingidas pressões superiores às definidas, o que pode significar a necessidade de uma intervenção de manutenção no filtro que apresentar a falha.

Contrariamente aos pressóstatos, os transdutores de pressão têm como principal função a leitura do diferencial de pressão entre duas tomas de pressão. Na UTA encontra-se um transdutor de pressão como o da Figura 4.14 associado a cada ventilador, com uma escala de pressão definida de 0 até 2500 Pa (Pascal), ou seja, o diferencial de pressão no ventilador é convertido pelo transdutor para um sinal analógico de 0 a 10 Volt.



Figura 4.14 – Transdutor de pressão

## 4.2. Características da Unidade de Tratamento de Ar

Tradicionalmente, uma UTA apresenta o sistema de aquecimento ou arrefecimento no exterior desta, o que leva a alguns problemas, passíveis de observar em instalações existentes que utilizam sistemas deste tipo, como sejam a complexidade das ligações entre a UTA e os respetivos equipamentos extrínsecos e conseqüentemente o espaço ocupado. Outras desvantagens das UTAs com sistema de aquecimento ou arrefecimento externo são o tempo, o custo e a complexidade de instalação elevados, assim como a poluição sonora na área envolvente e os consumos de energia mais elevados. Com vista a ultrapassar estes problemas, já se encontram, no mercado atual, UTAs com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, as quais dispensam a necessidade de estabelecer ligações a outros equipamentos e conseqüentemente facilita a sua instalação.

No caso em estudo, a UTA tem o sistema de aquecimento e arrefecimento integrado num só módulo que inclui as várias secções onde se encontram os diferentes componentes, o que permite um menor custo de produção. As secções da parte inferior e superior da unidade são, respetivamente, para a circulação do ar novo até à insuflação e do ar de retorno até à exaustão. À exceção das restantes secções, a secção do recuperador de calor está disposta de forma a intersestar ambas as circulações de ar, contudo, o cruzamento dos dois fluxos de ar nesta é desprezável (Figura 4.15).

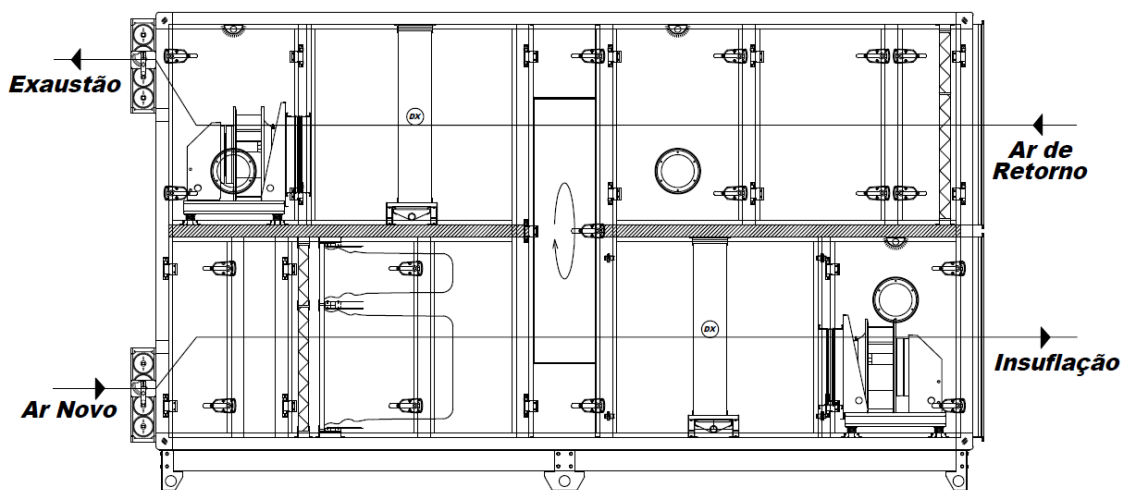


Figura 4.15 – Sentido de fluxo de ar na UTA

O funcionamento do sistema integrado de aquecimento e arrefecimento da UTA consiste num ciclo reversível de refrigeração. Os principais componentes associados a este tipo de ciclo são o compressor, uma válvula de 4 vias, uma válvula de expansão e as baterias de aquecimento/arrefecimento que funcionam uma como evaporador e outra como condensador consoante o ciclo. Na Figura 4.16 apresenta-se o funcionamento do ciclo frigorífico ideal teórico [27].

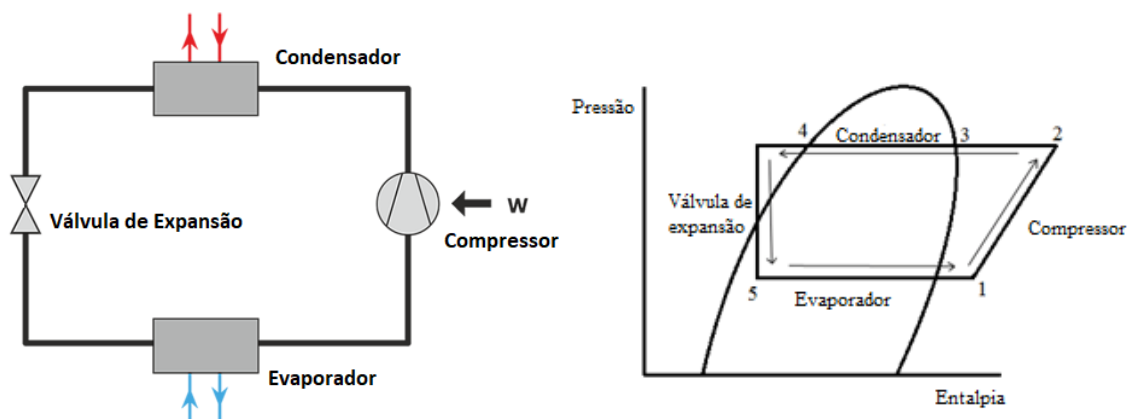


Figura 4.16 – Ciclo frigorífico adaptado de [27]

Quando se pretende o aquecimento do espaço climatizado (Figura 4.17), o fluído recebe energia do compressor quando o atravessa, aumentando a sua pressão e temperatura, o qual entra depois nas serpentinas da bateria, situada a montante do ventilador de insuflação, a elevada pressão para efetuar a troca de energia com o ar circulante na UTA; em consequência o fluído muda de estado gasoso para líquido à mesma pressão, ou seja, esta bateria neste ciclo tem a função de condensador. A válvula de expansão baixa então a pressão do líquido proveniente do condensador antes de ser levado ao evaporador. Neste caso o evaporador é a bateria situada a montante do ventilador de retorno, no qual o fluído no estado líquido à pressão de evaporação irá receber energia da permuta de calor com o ar circulante, provocando uma mudança de estado líquido para gasoso à mesma pressão. Por último, o fluído em estado gasoso a baixa pressão volta ao compressor, e o ciclo repete-se.

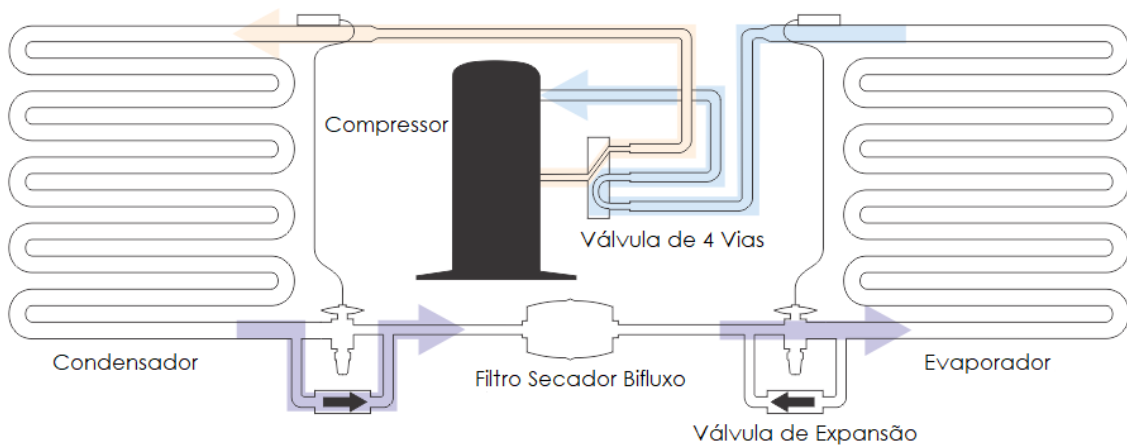


Figura 4.17 – Ciclo do gás refrigerante em modo de Aquecimento

Por outro lado, quando se pretende o arrefecimento Figura 4.18, a válvula de 4 vias presente no circuito é atuada invertendo o ciclo, isto é, as baterias com a função de condensador e evaporador em modo de aquecimento trocam de funções, passando a realizar o trabalho de evaporador e condensador, respetivamente.

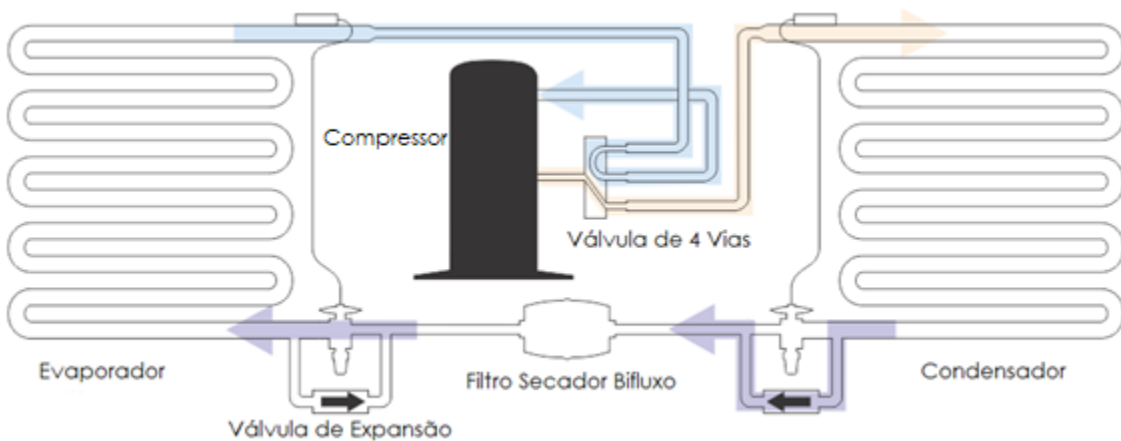


Figura 4.18 – Ciclo do gás refrigerante em modo de Arrefecimento

### 4.3. Hardware de Controlo

O controlo da unidade de tratamento de ar em estudo é feito através de um módulo controlador POL638.00 e de uma expansão POL955.00 da Siemens (Figura 4.19), previamente programados para cumprir com os objetivos. A aplicação deste hardware permite controlar o modo de funcionamento da UTA com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, incluindo o controlo do comportamento de cada equipamento, em função das condições atuais face às condições pretendidas.

A utilização de uma expansão para o módulo de controlo deve-se à necessidade de um maior número de variáveis de entrada e saída, relativamente às disponibilizadas pelo controlador propriamente dito.

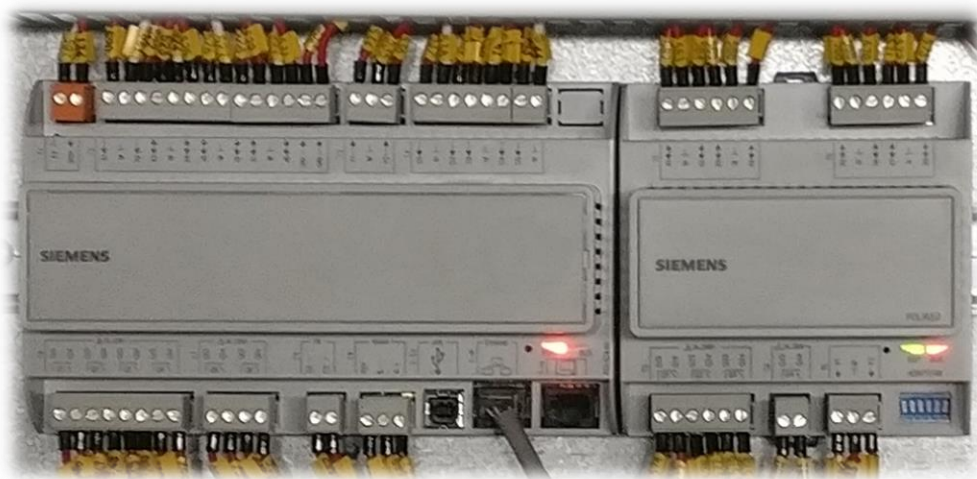


Figura 4.19 – Controlador POL638.00 (esquerda), Expansão POL955.00 (direita)

Para o funcionamento do controlador e da expansão é apenas necessária uma ligação de alimentação de 24V diretamente no controlador e uma ligação entre o controlador e a expansão. Relativamente às ligações destes com os equipamentos, ou seja, os sinais de entrada e saída (analógicos ou digitais) são efetuadas de acordo com a suas necessidades para o correto funcionamento (descritas no capítulo 4.1) e consoante a programação do controlador.

As ligações disponíveis pelo controlador e expansão encontram-se listadas, respetivamente, no anexo B e no anexo C.

Este controlador oferece a possibilidade de comunicação com um computador, através de ligação USB, através de ligação via *ethernet*, e também através de ligações *Modbus* e *Processbus*. A comunicação utilizada neste caso de estudo foi através de *ethernet* com o objetivo de transferir as configurações de programação do computador para a memória do controlador e de recolher dados dos ensaios realizados.

Para além das ligações dos equipamentos da UTA ao controlador e à expansão, são necessárias ligações elétricas de alimentação e respetivas medidas de proteção e segurança, tais como disjuntores, transformadores, barramentos, etc. A Figura 4.20 apresenta o quadro elétrico da UTA (o anexo D apresenta o esquema do quadro elétrico e respetiva legenda dos seus constituintes).

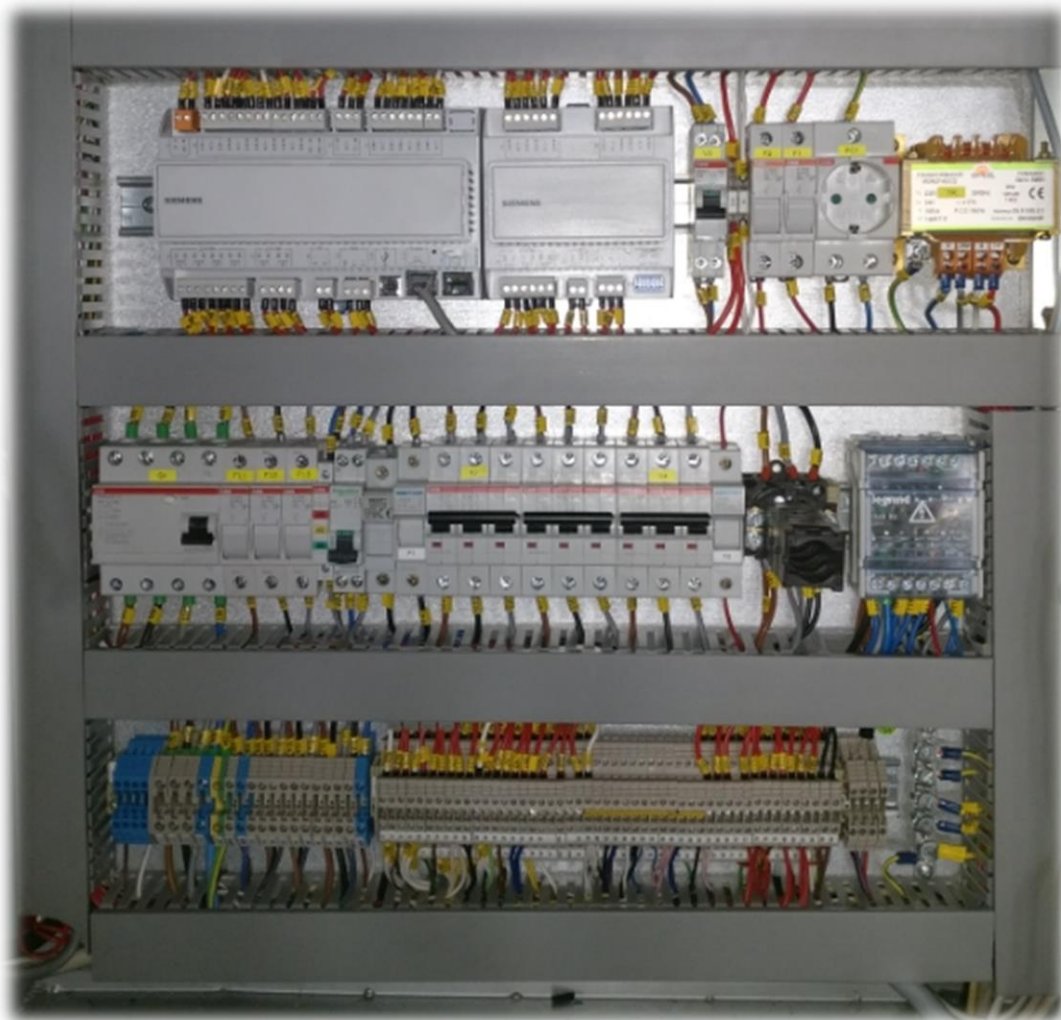


Figura 4.20 – Quadro elétrico da UTA

Seguidamente são apresentadas as listas de pontos dos equipamentos com ligações ao controlador e expansão, com os respetivos tipos de sinal de controlo designados por ED, SD, EA ou SA (entrada digital, saída digital, entrada analógica ou saída analógica). Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 encontram-se, respetivamente, as listas de pontos para o controlador POL638.00 e a expansão POL955.00.

Tabela 4.1 – Lista de pontos para o controlador POL638.00

Designação	Tipo de Sinal			
	ED	SD	EA	SA
<b>Sensor de temperatura de Ar Novo</b>			x	
<b>Sensor de temperatura de Insuflação</b>			x	
<b>Sensor de temperatura de Retorno</b>			x	
<b>OnOff da UTA</b>	x			
<b>Pressão do ventilador de Insuflação</b>			x	
<b>Pressão do ventilador de Retorno</b>			x	
<b>Pressóstato do pré-filtro de insuflação</b>	x			
<b>Pressóstato do filtro de insuflação</b>	x			
<b>Pressóstato do pré-filtro de retorno</b>	x			
<b>Recuperador de Calor</b>				x
<b>OnOff dos ventiladores</b>		x		
<b>Abertura dos Registos</b>		x		
<b>Fecho dos Registos</b>		x		
<b>Ventilador de Insuflação</b>				x
<b>Ventilador de Retorno</b>				x

Tabela 4.2 – Lista de pontos para a expansão POL955.00

Designação	Tipo de Sinal			
	ED	SD	EA	SA
<b>Sensor de Baixa pressão</b>			×	
<b>Sensor de Alta pressão</b>			×	
<b>Compressor</b>				×
<b>Válvula de Expansão</b>				×
<b>OnOff da Válvula de 4 Vias</b>		×		
<b>OnOff do Variador do Compressor</b>		×		

#### 4.4. Software de Controlo

Tendo em conta a utilização de componentes de controlo da Siemens, foram disponibilizados os softwares de automação SAPRO e SCOPE da Siemens – Climatix, apropriados para automação de equipamentos de climatização. Os dois softwares de controlo, apesar de apresentarem funcionalidades distintas, posteriormente descritas, têm a finalidade comum de controlar e monitorizar a UTA em estudo.

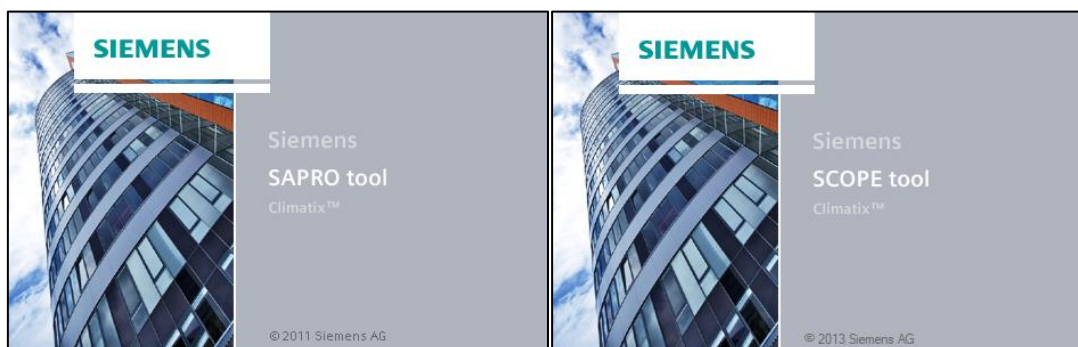


Figura 4.21 – Logótipo do software: SAPRO (esquerda), SCOPE (direita)

Relativamente ao software SAPRO, trata-se de um módulo de programação gráfica, com base na norma IEC 61131-3, desenvolvido com o objetivo de controlar e monitorizar equipamentos de sistemas de AVAC.

A interface do utilizador deste software é essencialmente constituída por uma área de programação (1), uma lista de objetos (2) e uma secção de visualização de erros e respetivo estado da programação (3), tal como se encontra representado na Figura 4.22.

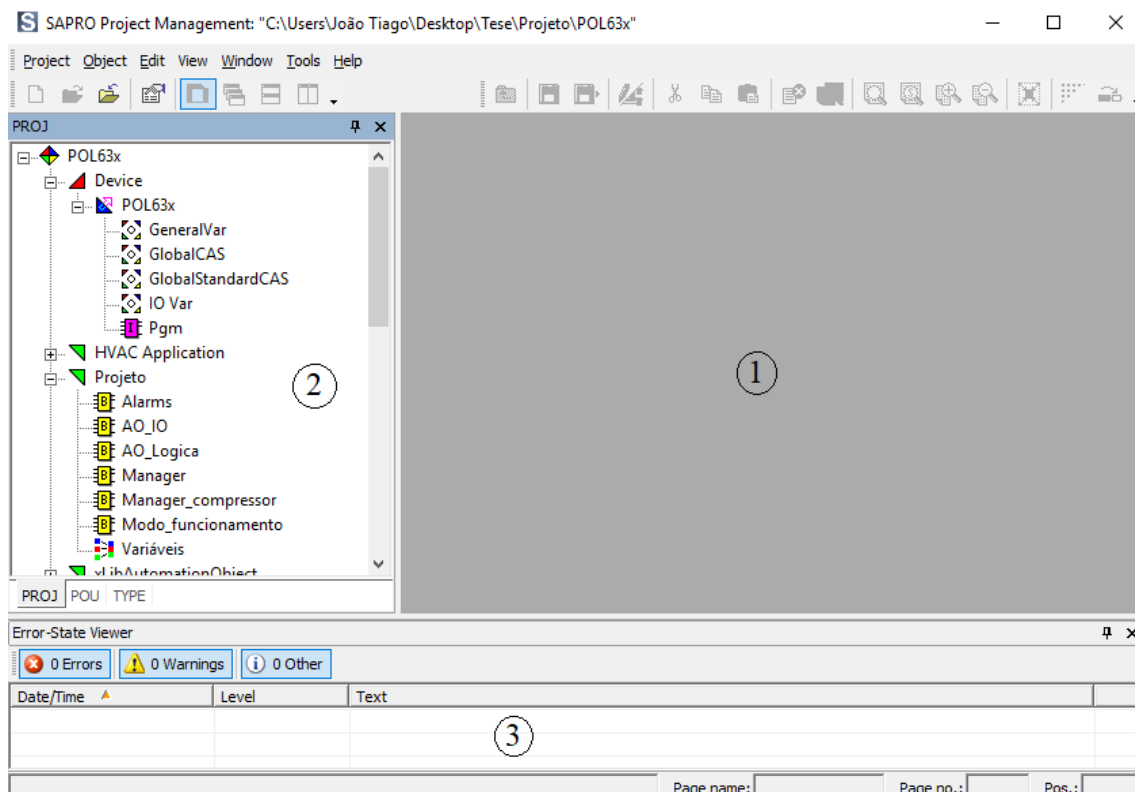


Figura 4.22 – Interface do utilizador do software SAPRO (Siemens-Climatix)

As principais funcionalidades do software SAPRO são a programação do tipo FBD, comunicação com o controlador, simulação online e um conjunto de blocos de programação Standard concebido para aplicação em sistemas de AVAC.

Apesar da programação ser realizada por blocos, o correto funcionamento requer a utilização de objetos com finalidades distintas, pelo que se encontram os objetos mais relevantes na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Objetos do software SAPRO

<b>Simbologia</b>	<b>Designação</b>	<b>Descrição</b>
	<i>Project</i>	Objeto tipo “pasta” onde se encontram todos os objetos relacionados com o projeto.
	<i>Library</i>	Objeto tipo “pasta” designado por biblioteca onde são dispostos objetos e até outras bibliotecas ( <i>sub-libraries</i> ), como meio de organização.
	<i>Global Variables</i>	Grupo de variáveis globais que podem ser editadas e utilizadas por objetos do tipo POU*
	<i>Program Instance</i>	Associado a um objeto <i>Program Type</i> , com finalidade específica definida pelo utilizador.
	<i>Program Type</i>	Objeto no topo da hierarquia programado para controlar os objetos e efetuar a invocação de objetos de funções lógicas.
	<i>Function Block Type</i>	Objeto tipo bloco de funções lógicas com dados de instância (informação do estado do objeto).
	<i>Function</i>	Objeto tipo bloco de funções lógicas sem dados de instância.
	<i>Data Type</i>	Objeto de dados definido pelo utilizador (estruturas, campos, enumerações, etc.) que posteriormente podem ser usados por outros blocos de programa.

\**Program Organization Unit (POU)* são objetos que podem ser programados em linguagens do tipo FBD, SFC e ST.

Apresentam-se em seguida alguns dos blocos de funções lógicas mais utilizados na programação desenvolvida para o caso de estudo.

- i) Funções lógicas de comparações matemáticas (Figura 4.23) destinam-se a efetuar comparações de valores inteiros ou reais, onde as duas entradas à esquerda de cada bloco são os valores a comparar, e a saída à direita representa um sinal positivo caso a comparação seja verdadeira.



Figura 4.23 – Blocos de funções lógicas de comparação matemática

- ii) No caso dos blocos de funções lógicas apresentados na Figura 4.24 (soma, subtração, multiplicação e divisão), são utilizados para realizar cálculos numéricos, onde as duas entradas à esquerda do bloco são os valores utilizados para o cálculo e a saída à direita o seu valor do resultado.

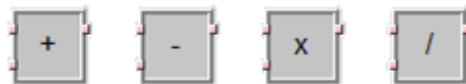


Figura 4.24 – Funções lógicas matemática

- iii) Quanto aos blocos de funções de lógica booleana, através de sinais digitais de valor 0 ou 1, respetivamente designados por sinais falsos ou verdadeiros, os sinais de saída são verdadeiros se a condição do bloco for confirmada pelos sinais de entrada. Como exemplo, os blocos apresentados na Figura 4.25, em que o bloco “&” da esquerda representa a condição “e”, onde o sinal de saída é verdadeiro somente quando os dois sinais de entrada são verdadeiros. Quanto ao bloco “>=1” representa a condição “ou”, no qual a saída é verdadeira quando um dos sinais de entrada é verdadeiro ou se ambos forem verdadeiros. Contrariamente a este último, o bloco “=2k+1” que representa a condição “ou exclusivo”, o sinal de saída é verdadeiro quando somente um dos sinais de entrada é verdadeiro.

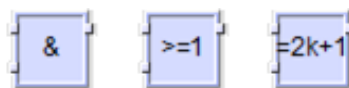


Figura 4.25 – Funções de lógica booleana

- iv) O bloco “MUX” representado na Figura 4.26, dependendo do sinal presente na entrada designada por “K”, tem a função de selecionar um dos restantes sinais de entrada. Por exemplo, se o sinal de “K” igual a 0, o primeiro sinal de entrada é selecionado como sinal de saída do bloco; se o sinal de “K” igual a 1, é então o segundo sinal de entrada selecionado como sinal de saída do bloco.

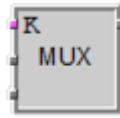


Figura 4.26 – Bloco de seleção

- v) Quando se pretende colocar um temporizador para atrasar o início de uma operação ou limitar a duração de uma operação, utilizam-se os blocos “TON” e “TP”, respetivamente. Os blocos “TON” e “TP” da Figura 4.27, apresentam uma entrada “IN” cujo sinal de entrada inicia a contagem do tempo definido na entrada “PT”, e uma saída “Q” que fornece o sinal para efetuar a operação. Assim, o bloco “TON” apenas permite o início da operação após um sinal verdadeiro na entrada “IN” e o tempo definido terminado. O bloco “TP” inicia a operação no instante em que a entrada “IN” apresenta um sinal verdadeiro, mas termina quando a contagem do tempo definido acabar.



Figura 4.27 – Blocos de temporização

- vi) O bloco “>TIME” da Figura 4.28, realiza a conversão de qualquer tipo de número para um valor do tipo tempo, por exemplo se na entrada for colocado um valor real de 15,0 este é convertido para um valor do tipo tempo de 15 segundos. Outro bloco de conversão, o bloco “>BOOL” (Figura 4.28), tem o objetivo de converter qualquer tipo de número na entrada do bloco para um valor booleano (0 ou 1) na saída do bloco, por exemplo o resultado da conversão de um valor inteiro igual ou superior a 1 é um valor booleano de 1.



Figura 4.28 – Blocos de conversão

- vii) Os blocos apresentados na Figura 4.29, “F\_TRIG” e “R\_TRIG” são constituídos por uma entrada “CLK” e saída “Q”. Estes blocos colocam a saída booleana verdadeira quando são detetadas alterações no sinal de entrada verdadeiro para falso e de falso para verdadeiro, respetivamente.



Figura 4.29 – Blocos de deteção de variações numa variável booleana

Uma vez efetuada a programação do controlador, por via do software SCOPE torna-se possível a visualização e a recolha de dados em tempo real dos componentes a controlar, bem como alterar determinados parâmetros dos objetos com o principal objetivo de melhorar o comportamento do sistema.

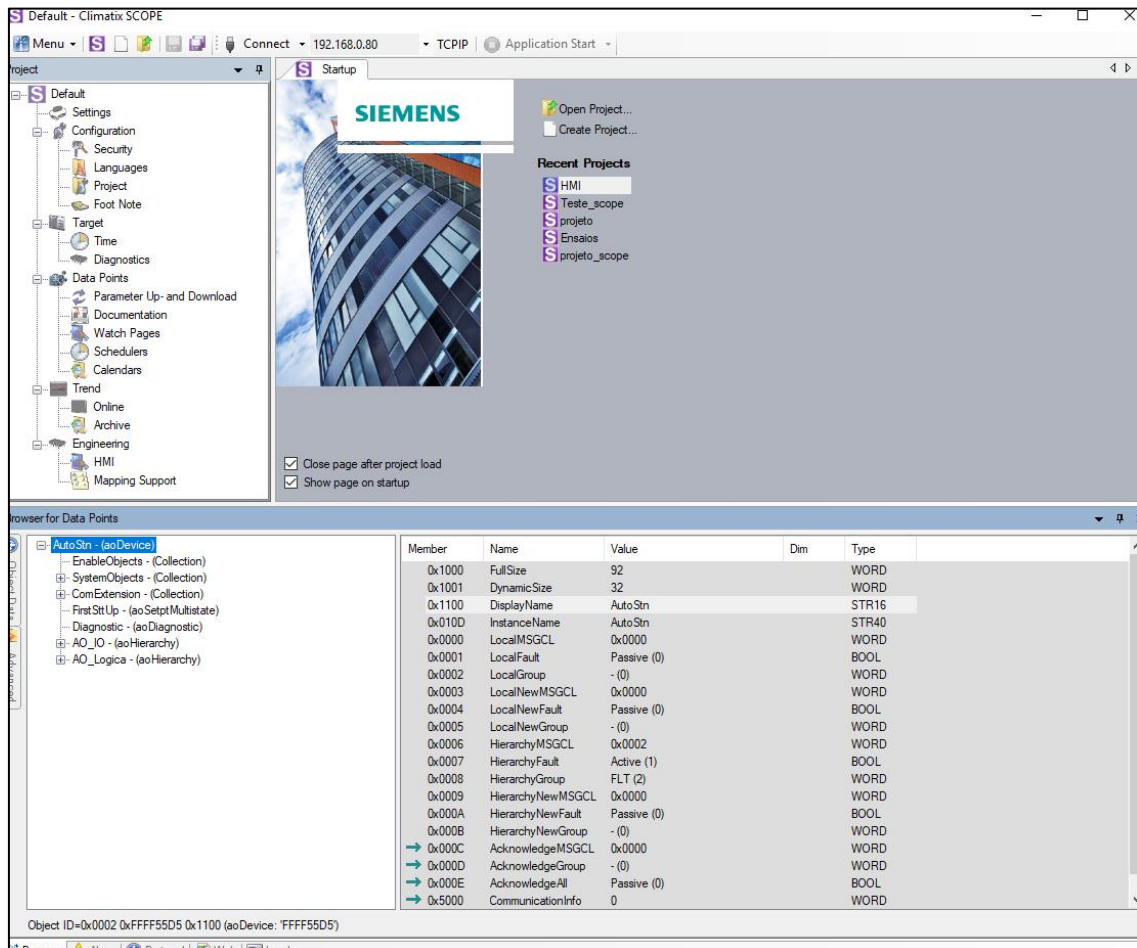


Figura 4.30 – Interface do utilizador do software SCOPE (Siemens-ClimateX)

Quanto ao software SCOPE, as suas principais funcionalidades são:

- Carregar e eliminar programa, arquivo de mapeamento, etc.
- Exibir e editar objetos e membros.
- Carregar e baixar parâmetros (objetos e membros).
- Exibir mensagens de alarme.
- Exibir dados e gráficos online.
- Armazenamento e exibição de dados arquivados.
- Atualizar o sistema operacional do controlador.

## Capítulo 5. Ensaio Experimental e Interpretação de Resultados

### 5.1. Algoritmo de Controlo

De modo a gerar a programação para a UTA em estudo, através do software *SAPRO*, e considerando todos os componentes a controlar, foram definidas simbologias e os nomes das variáveis de entrada e de saída do controlador e da expansão do controlador, conforme apresentado na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2, respetivamente.

Tabela 5.1 – Variáveis de entrada e de saída do controlador

Variáveis de Entrada	Variáveis de Saída
X1 – Sensor temperatura de Ar Novo	X8 – Recuperador de Calor
X2 – Sensor temperatura de Insuflação	Q1 – OnOff ventiladores
X3 – Sensor temperatura de Retorno	Q3 – Registos On
X4 – OnOff Remoto	Q4 – Registos Off
X5 – Pressão ventilador Insuflação	Y1 – Ventilador Insuflação
X6 – Pressão ventilador de Retorno	Y2 – Ventilador de Retorno
D1 – Falha pré-filtro	
D2 – Falha filtro Insuflação	
D3 – Falha filtro Retorno	
D4 – Falha ventilador Insuflação	
D5 – Falha ventilador Retorno	

Tabela 5.2 – Variáveis de entrada e de saída da expansão do controlador

Variáveis de Entrada	Variáveis de Saída
X9 – Sensor Baixa pressão	X13 – Compressor
X10 – Sensor Alta pressão	X16 – Válvula de Expansão
	DO1 – OnOff Válvula 4 Vias
	DO2 – OnOff Variador Compressor_ccw
	DO4 – OnOff Variador Compressor_cw

A programação foi desenvolvida para três modos de arranque e paragem da máquina: um primeiro modo em que o arranque e a paragem da UTA são fornecidos pelo utilizador através de um sinal digital, um segundo modo em que o arranque é feito por um sinal remoto (por exemplo, um botão), e um último modo para realizar a paragem dos componentes da UTA ou não permitir o arranque da mesma, em caso de uma falha crítica.

Após ser fornecido um sinal de arranque da UTA, os registos são acionados e abertos totalmente, e apenas depois de um determinado intervalo de tempo, definido pelo utilizador, os ventiladores e o recuperador de calor podem ser controlados.

O controlo dos ventiladores pode ser efetuado pelo *setpoint* de caudal volúmico pretendido, expresso em metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h), ou pelo *setpoint* de pressão pretendida, expressa em Pascal (Pa), conforme a necessidade do utilizador.

Relativamente ao controlo do recuperador de calor, o valor de *setpoint* definido em graus Celsius (°C) é comparado com o valor de temperatura de insuflação, diferença esta que regula a ação do recuperador.

Seguidamente é selecionado, manual ou automaticamente, um dos seguintes Modos de Operação:

- Free-Cooling – Apenas os ventiladores e o recuperador de calor podem entrar em funcionamento e serem controlados, com o objetivo principal de introduzir ar novo sem qualquer aquecimento ou arrefecimento e extrair o ar de retorno.
- Aquecimento – O ciclo frigorífico inicia-se com a válvula 4 vias na posição de repouso e apenas se os ventiladores estiverem em funcionamento. Neste modo é possível efetuar o controlo dos ventiladores, recuperador de calor e do trabalho do compressor dependente da válvula de expansão.
- Arrefecimento – distingue-se do modo de aquecimento por a válvula 4 vias ser atuada antes do compressor dar início ao ciclo.

Posteriormente, se o modo de operação selecionado for o Arrefecimento ou o Aquecimento, são iniciados procedimentos de segurança necessários para o arranque do compressor e respetivo ciclo frigorífico. Antes de iniciar os procedimentos os ventiladores devem encontrar-se em funcionamento durante um intervalo de tempo mínimo (30 segundos); liga-se então o compressor com a capacidade mínima (30%) durante um intervalo de tempo a definir, abre-se a válvula de expansão para uma posição

mínima (30%) e somente depois é possível realizar o controlo do compressor e da válvula de expansão.

Entretanto, se não houver nenhuma alteração no modo de funcionamento nem no modo de operação, os controladores utilizados continuam a fazer o controlo dos ventiladores, do recuperador de calor, do compressor e da válvula de expansão para atingir os valores pretendidos. Caso contrário, se for solicitada uma das seguintes ações:

- O desligar da UTA - o modo de funcionamento passa para OFF e por motivos de segurança dos equipamentos iniciam-se os processos de paragem, até todos os componentes se encontrarem em repouso.
- A mudança para o estado de operação Free-Cooling - iniciam-se os processos de paragem de todos os componentes à exceção dos ventiladores.
- A mudança do estado de operação, Aquecimento para Arrefecimento ou vice-versa - inicia-se o processo de mudança de ciclo.

O processo de paragem dos componentes tem início na paragem do compressor, o que exige que o trabalho do compressor se reduza à capacidade mínima durante um certo intervalo de tempo; seguidamente fecha-se a válvula de expansão e só depois se desliga o compressor. Posteriormente, desligam-se o recuperador de calor e os ventiladores, pela ordem descrita caso o desligar da UTA tenha sido previamente solicitado, enquanto que na mudança para o estado de operação Free-Cooling os ventiladores continuam em atividade.

Caso seja iniciado o processo de mudança de ciclo, é feita a paragem do compressor tal como anteriormente descrita, depois o compressor permanece desligado um determinado intervalo de tempo, até que se inverte o ciclo e a válvula de 4 vias atua ou desliga para a posição oposta do modo de funcionamento anterior. Somente após este procedimento, pode ser efetuado novamente o processo de arranque do compressor no ciclo oposto pretendido.

Uma vez que é necessário haver um sistema de proteção de pessoas e bens, gerou-se um sistema com duas classificações de alarmes, “alarme crítico” e “alarme não crítico” com finalidades distintas. O “alarme crítico” é acionado quando ocorre uma falha num ou nos dois ventiladores, neste caso o sinal digital gerado por este alarme passa a UTA para o modo de paragem. Por outro lado, o “alarme não crítico” corresponde à emissão de um

sinal digital quando existe uma falha no pré-filtro, ou no filtro de insuflação ou no filtro de retorno, o que permite alertar o utilizador, mas a UTA permanece no modo de funcionamento atual.

## 5.2. Programação desenvolvida

A programação desenvolvida encontra-se dividida em dois blocos principais distintos, um designado “AO\_IO” onde são definidas as variáveis de entrada e de saída do controlador e da expansão, e outro designado “AO\_Logica” no qual é definida a lógica de acordo com o algoritmo de controlo definido anteriormente ( Figura 5.1).



Figura 5.1 – Diagrama dos blocos principais do programa desenvolvido

## 5.2.1. Programação das variáveis de entrada e saída

Na programação desenvolvida no bloco “AO\_IO” (anexo E), através de blocos standard apropriados para o controlador Pol638 e para a expansão, definiu-se cada tipo de variável de entrada e de saída, consoante o tipo de sinal emitido ou recebido pelos equipamentos a estes ligados. Nestes blocos, as variáveis de entrada encontram-se ligadas no lado direito do diagrama do bloco e as variáveis de saída no lado esquerdo, tal como se indica na Figura 5.2.

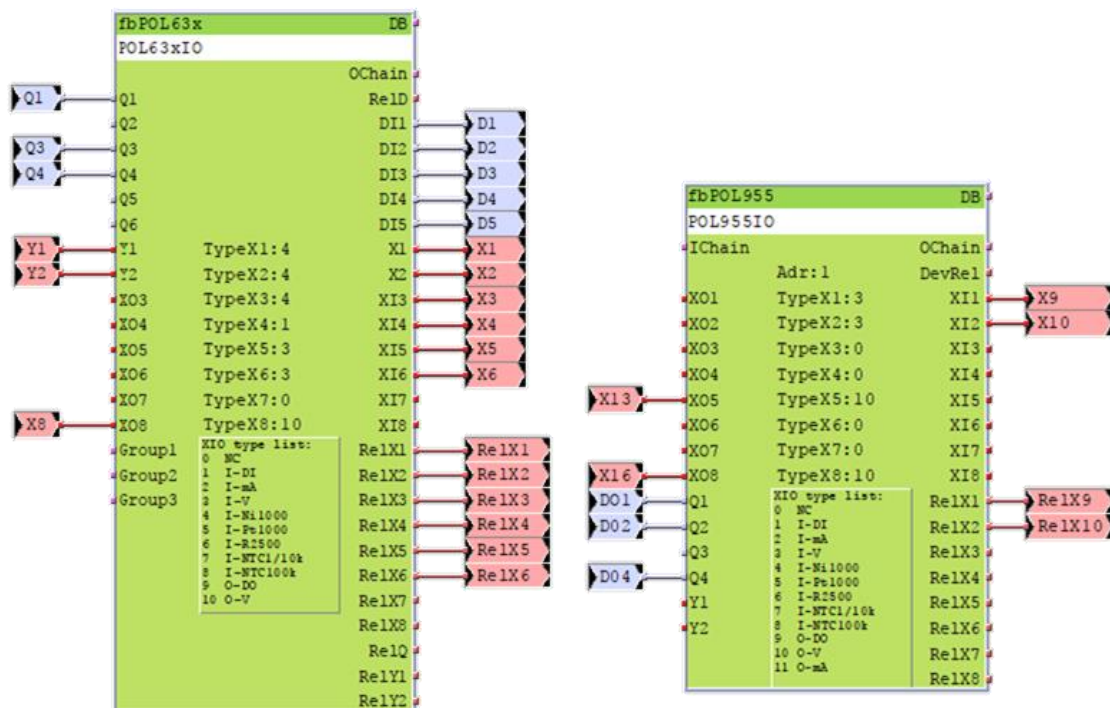


Figura 5.2 – Diagrama das ligações de variáveis de entrada e de saída no controlador (bloco à esquerda) e na expansão (bloco à direita)

Quanto às variáveis de entrada e de saída poderem ser utilizadas e controladas noutros objetos de programação criados para o projeto é necessário associar variáveis globais, tendo-se recorrido a blocos com as seguintes designações: *AnalogInput*, *AnalogOutput*, *BinaryInput* e *BinaryOutput*.

No caso da variável X1, esta recebe um sinal analógico de resistência elétrica do sensor de temperatura de Ar Novo, que posteriormente é convertido pelo bloco *AnalogInput* com o nome “Temperatura\_ArNovo” num valor de temperatura expresso em graus Celsius (°C) definido pela variável “Var.Temp[1]”, como se indica na Figura 5.3.

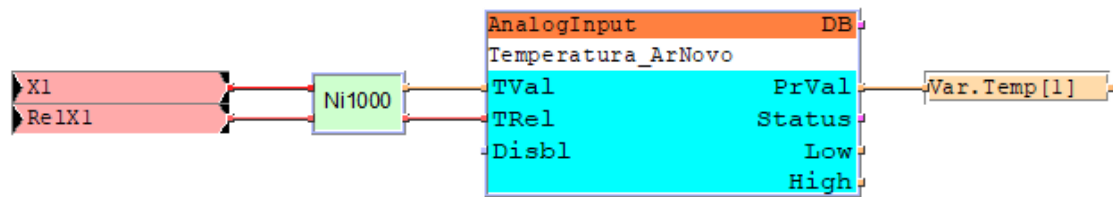


Figura 5.3 – Exemplo de *Analog Input* - Temperatura\_ArNovo

O mesmo procedimento foi efetuado para as variáveis X2 e X3 com o fim de obter as variáveis “Var.Temp[2]” e “Var.Temp[3]” porque são variáveis de entrada analógicas de sensores de temperatura iguais e assim a conversão de sinal pode seguir a mesma lógica. No caso dos sensores de pressão, o procedimento foi semelhante ao aplicado nos sensores de temperatura, com a distinção do sinal analógico dos sensores de pressão ser expresso em Volt e a consequente diferença na conversão do sinal, conforme indicado na Figura 5.4. As variáveis obtidas a partir dos sensores de pressão são as variáveis “Var.Pressao[1]”, “Var.Pressao[2]”, “Var.Pressao[3]” e “Var.Pressao[4]” apresentadas no controlador em percentagem entre 0 e 100%, que correspondem aos valores definidos pela escala de pressão de cada sensor.

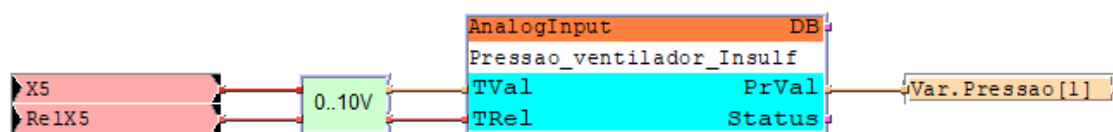


Figura 5.4 – *AnalogInput* - Pressao\_ventilador\_Insulf

Relativamente às variáveis analógicas de saída X8, Y1, Y2, X13 e X16, têm origem numa variável de ação proveniente da lógica gerada no bloco “AO\_Logica”. A Figura 5.5, mostra que a variável de ação “Var.Acao[1]” comunica um sinal ao bloco *AnalogOutput* “Recuperador\_Calor”, o qual converte o mesmo num sinal entre 0 e 10 Volt, posteriormente levado pelo controlador até ao equipamento que se pretende controlar, neste caso o recuperador de calor.

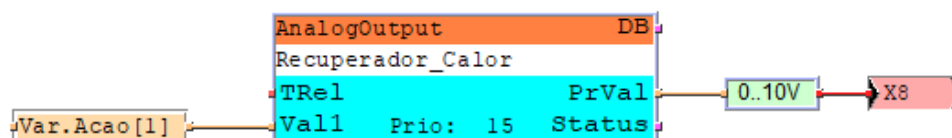


Figura 5.5 – Exemplo de *AnalogOutput* – Recuperador\_Calor

Tal como no caso anterior, às variáveis analógicas Y1, Y2, X13 e X16 correspondem as variáveis globais “Var.Acao[2]”, “Var.Acao[3]”, “Var.Acao[4]” e “Var.Acao[5]”.

Os sinais de entrada digitais recebidos pelo controlador ou pela expansão são ligados a um bloco do tipo *BinaryInput* como se demonstra na Figura 5.6 para obter uma variável global (“Var.DigitalIn[6]”), e sendo a variável X4 um valor inteiro tem de ser convertido num sinal booleano (valor de 0 ou 1) antes de ligar ao bloco.

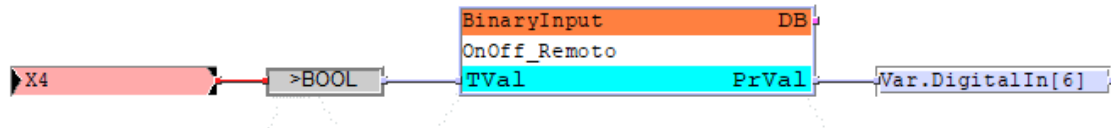


Figura 5.6 – Exemplo de *BinaryInput* - OnOff\_Remoto

Por último, as variáveis de saída digitais Q1, Q3, Q4 do controlador e D01, D02 e D04 da expansão têm a função de ligar ou desligar o equipamento ao qual estão ligados consoante a lógica definida. Assim, o sinal de saída de cada variável encontra-se associado a uma variável global como no exemplo da Figura 5.7 em que o sinal de saída Q1 depende do sinal da variável global “Var.DigitalOut[1]”.

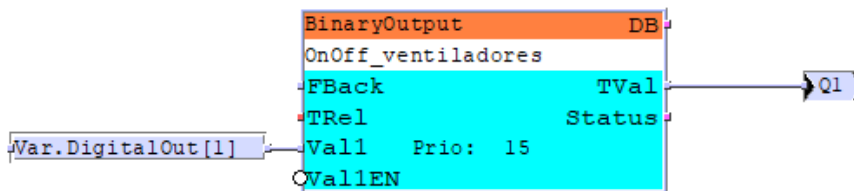


Figura 5.7 – Exemplo de *BinaryOutput* – OnOff\_Ventiladores

## 5.2.2. Programação da lógica de controlo

Na programação efetuada em “AO\_Logica” (anexo F) foi criado um bloco e respetiva programação designado por “Manager” com o objetivo de controlar os modos de arranque ou paragem da UTA. A programação deste bloco (anexo G) foi feita como se apresenta na Figura 5.8, recorrendo a um bloco do tipo “MultistateValue” onde são definidas as prioridades de cada modo de arranque ou paragem. Para a menor prioridade aplicada (prioridade 10), o utilizador define um valor inteiro de 1 para efetuar o arranque da máquina, ou um valor inteiro de 0 caso seja pretendido realizar a paragem da máquina. Para uma prioridade superior à anterior (por ex. prioridade 7), o utilizador pode acionar o arranque da máquina através de um sinal remoto definido pela variável “Var.DigitalIn[6]”. Quanto à maior prioridade deste bloco (prioridade 1), tem o objetivo de efetuar a paragem da máquina no caso de existir uma falha no sistema, falha esta definida pela variável “Var.DigitalOut[4]”.

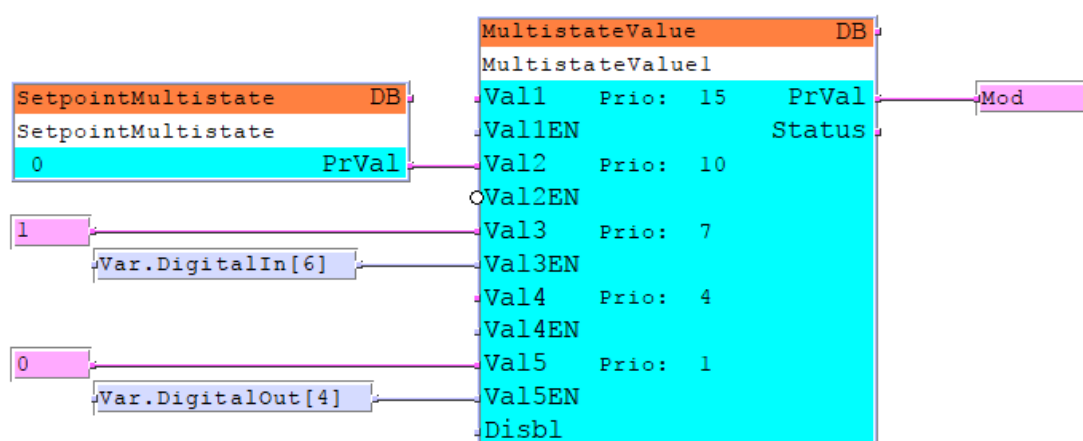


Figura 5.8 – Programação do bloco "Manager"

Quando o sinal de saída do bloco “Manager” apresenta o valor inteiro 1 o mesmo é convertido num sinal digital verdadeiro (Fig.5.9) e é dado o arranque da máquina através da variável “Var.DigitalOut[2]”, a qual é responsável por levar o sinal à variável de saída “Registos\_On”, ou seja, os registos de caudal começam a abrir as pás. Contrariamente a variável “Var.DigitalOut[3]” apesar de receber este mesmo sinal, como a sua função é fechar os registos, esta variável só se torna verdadeiro quando o sinal for o inverso (falso).

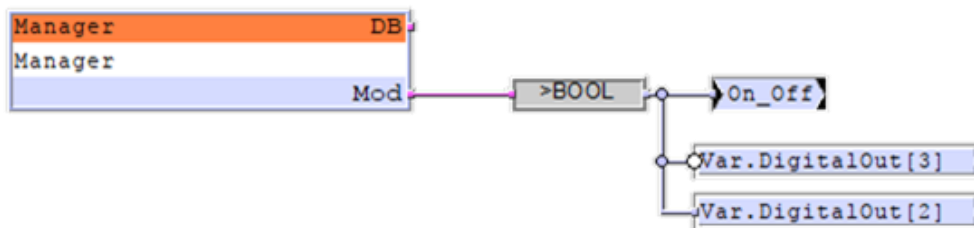


Figura 5.9 – Abertura ou Fecho dos registos

Na Figura 5.10 apresenta-se a lógica que permite o arranque dos ventiladores, onde se aplicou um temporizador do tipo TON, o qual depende do bloco “SetTempo\_Enable\_Vent”, que define o tempo necessário decorrer após a variável “On\_Off” receber sinal; neste caso foi definido um intervalo de 30 segundos antes de “Var.DigitalOut[1]” e “EnableVent” receberem sinal para iniciarem o trabalho dos ventiladores.

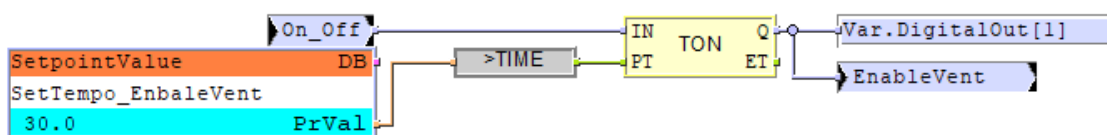


Figura 5.10 – Temporizador antecedente ao arranque dos ventiladores

A lógica desenvolvida para efetuar o controlo do ventilador de insuflação apresenta-se na Figura 5.11, como a seguir se descreve.

A partir do momento que chega um sinal a “EnableVent” é permitido o trabalho dos ventiladores. Assim, o utilizador pode escolher o modo de controlo dos ventiladores, através do bloco “Controlo\_Vent\_Ins”, do qual resulta um valor inteiro de 0 para controlo por caudal de ar em m<sup>3</sup>/h e um valor inteiro de 1 para efetuar o controlo com valores de pressão em Pascal. Uma vez escolhido o modo de controlo, é possível definir o valor de *setpoint* do caudal ou da pressão pretendidos nos blocos “Caudal\_Vent\_Ins” e “Pressão\_Vent\_Ins”, respetivamente.

Tal como mencionado anteriormente (capítulo 2), um controlo em anel fechado compara o valor de *setpoint* com o valor detetado pelo sensor. Neste caso, como o utilizador pode ter um *setpoint* de caudal ou de pressão, o valor da variável controlada tem de se encontrar nas mesmas unidades para se ter um correto controlo do ventilador. Deste modo, realizou-

se a conversão do sinal “Var.Pressão[1]” com valores de percentagem entre 0 e 100, para pressão em Pascal e para caudal de ar em m<sup>3</sup>/h. Na conversão para valores de pressão em Pascal e conhecendo a escala de pressão dos ventiladores, 0 até 2500 Pa, utilizou-se a equação 5.1.

$$Pressão = \frac{2500 \times "Var.Pressão[1]"}{100} = 25 \times "Var.Pressão[1]" \quad (5.1)$$

A conversão para caudal de ar em m<sup>3</sup>/h pode ser feita como se encontra na equação 5.2 utilizando o valor de pressão calculado anteriormente em Pascal e através de um fator  $k$  (designado por coeficiente de bocal) característica do ventilador estabelecido pelo fornecedor [21], que no ventilador em estudo corresponde a um valor de 154.

$$Caudal = k \times \sqrt{Pressão} = 154 \times \sqrt{Pressão} \quad (5.2)$$

Assim, o controlo dos ventiladores pode ser efetuado pelo bloco “Ventilador\_Insuflacao”, o qual funciona como um controlador do tipo PID e os respetivos parâmetros ( $k_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ ) podem ser ajustados às necessidades do equipamento a controlar. Após definidos o *setpoint* e o valor da variável controlada, o controlador envia um sinal para a variável “Var.Acao[2]” com o objetivo de fazer chegar ao ventilador o sinal de controlo limitado entre 0 e 100 por este bloco como se apresenta na Figura 5.11.



A lógica aplicada no ventilador do Ar de Retorno foi semelhante à anteriormente descrita para o ventilador de insuflação, devido aos ventiladores serem iguais, mas com diferenças na variável manipulada que é a “Var.Pressao[2]” e no sinal de saída que é dado pelo controlador fornecido pela variável “Var.Acao[3]”.

Do mesmo modo que é permitido o controlo dos ventiladores, o controlo do recuperador de calor necessita que a variável “EnbaleVent” apresente um sinal positivo para realizar trabalho. Contudo, o arranque do recuperador de calor depende também das condições de temperatura presentes na UTA, sendo necessário que o valor de *setpoint* (“Set\_RC”) pretendido pelo utilizador seja superior à temperatura de ar novo (“Var.Temp[1]”) e simultaneamente a temperatura de ar novo inferior à temperatura de retorno (“Var.Temp[3]”), ou por outro lado, que o valor de *setpoint* seja inferior à temperatura de ar novo e em simultâneo a temperatura de ar novo superior à temperatura de retorno. Estes dois casos possíveis para o funcionamento do recuperador de calor são mais frequentes no inverno e no verão, respetivamente.

O controlador associado ao recuperador de calor, tal como utilizado para os ventiladores é um controlador do tipo PID, representado pelo bloco “Recuperador\_calor”, cujos parâmetros podem ser ajustados. O *setpoint* deste controlador é comparado com o valor de temperatura de insuflação (“Var.Temp[2]”), resultando uma ação de controlo deste equipamento fornecida pelo sinal “Var.Acao[1]” limitada entre 0 e 100%

Na Figura 5.12, apresenta-se a lógica desenvolvida relativa ao controlo do recuperador de calor conforme anteriormente descrito.

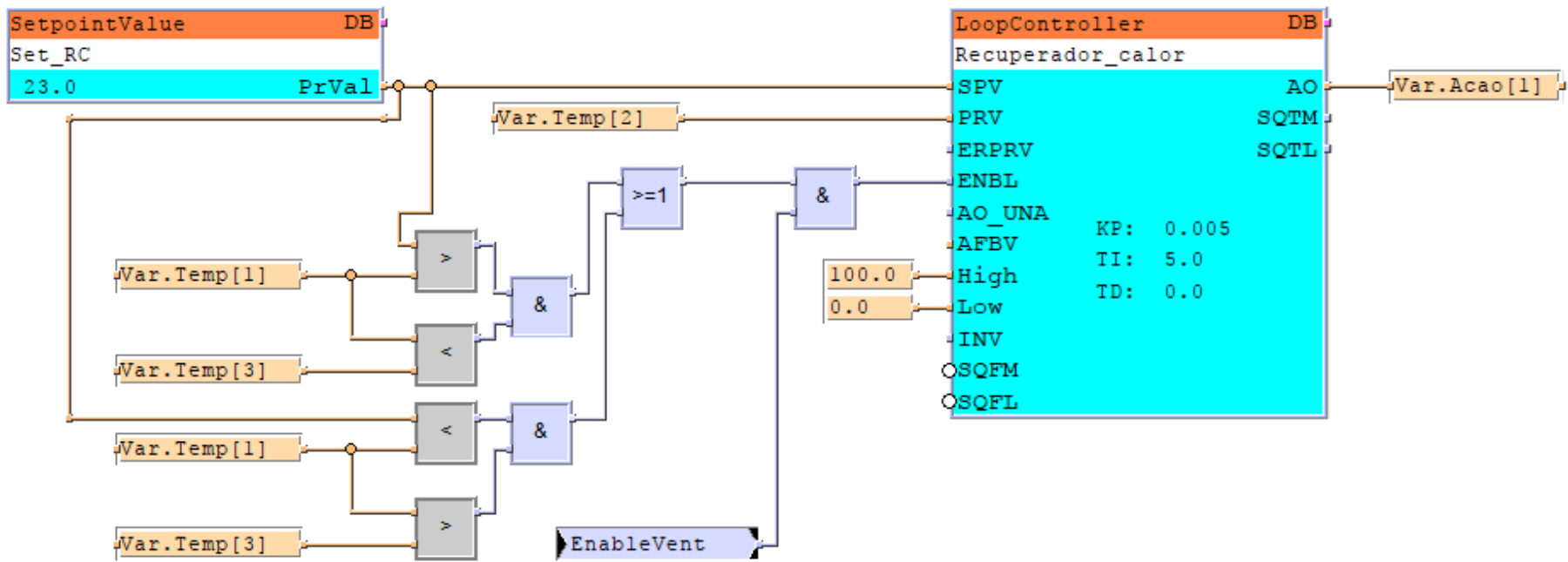


Figura 5.12 – Controlo do Recuperador de Calor

Relativamente ao modo de operação da UTA, este é escolhido pelo utilizador no bloco designado por “Modo\_operacao” (programação apresentada no anexo H), sendo que para o modo Free-Cooling o sinal de saída apresenta o valor inteiro 0, para o modo de Aquecimento apresenta o valor inteiro 1 e para o modo de Arrefecimento o valor inteiro 2, tal como apresentado na Figura 5.13.

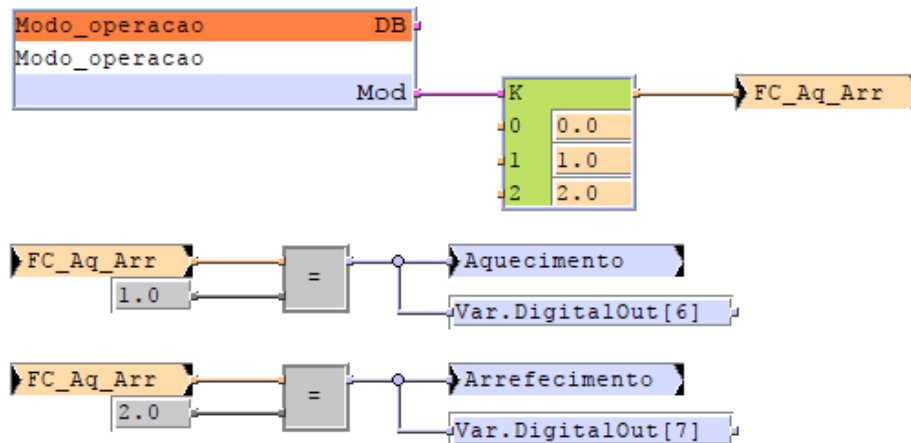


Figura 5.13 – Programação do modo de operação da UTA

Quanto ao sinal de arranque ou paragem do compressor fornecido pelo bloco “Manager\_compressor” (Figura 5.14), este pode ser estabelecido pelo utilizador na menor prioridade (10) com um valor inteiro de 0 ou 1, respetivamente para a paragem e arranque. As variáveis “Var.DigitalOut[6]” e “Var.DigitalOut[7]”, para a prioridade (7), fornecem um sinal de arranque do compressor quando somente uma das variáveis apresenta sinal positivo. A paragem do compressor é realizada pela maior prioridade quando “Var.DigitalOut[11]” ou “Var.DigitalOut[12]” apresentam sinal positivo.

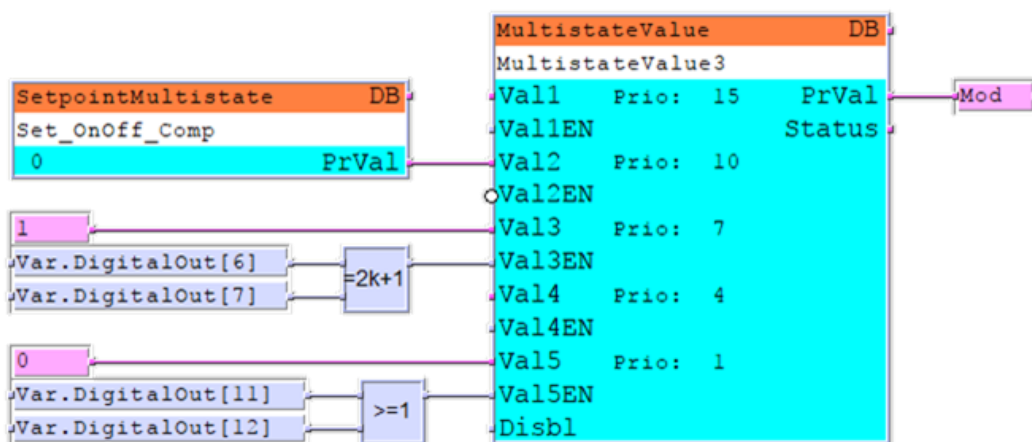


Figura 5.14 – Programação do bloco “Manager\_compressor”

O sinal de saída do bloco “Manager\_compressor” (anexo I) é convertido numa variável booleana “OnOff\_compressor”, cujo sinal verdadeiro inicia o processo de arranque do compressor e o sinal falso inicia o processo de paragem do compressor (Figura 5.15).

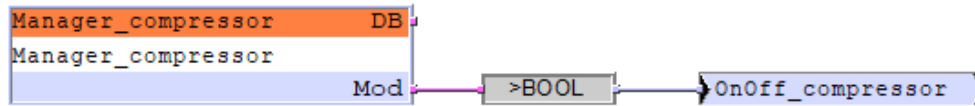


Figura 5.15 – Sinal de arranque ou paragem do compressor

Uma vez iniciado o processo de arranque do compressor, antes de ser fornecida uma ordem de funcionamento ao mesmo, é verificado se os ventiladores se encontram em trabalho superior a 30% durante mais de 30 segundos e se a pressão detetada pelo sensor à entrada do compressor é superior à definida (Figura 5.16). Caso as condições anteriores sejam verificadas, através da variável “Var.DigitalOut[8]” é levada ao compressor a ordem para funcionamento na sua capacidade mínima (30% da frequência máxima). Após o funcionamento do compressor à capacidade mínima durante 30 segundos, a válvula de expansão recebe o sinal “Var.DigitalOut[9]” que coloca a válvula na abertura mínima (30%) durante mais 30 segundos. Posteriormente, é permitido o controlo do compressor e da válvula de expansão através das variáveis “Enable\_Compressor” e “Enable\_VE”, respetivamente.

O controlo do compressor e da válvula de expansão é efetuado através de controladores PID semelhantes aos utilizados para o controlo dos ventiladores e do recuperador de calor.

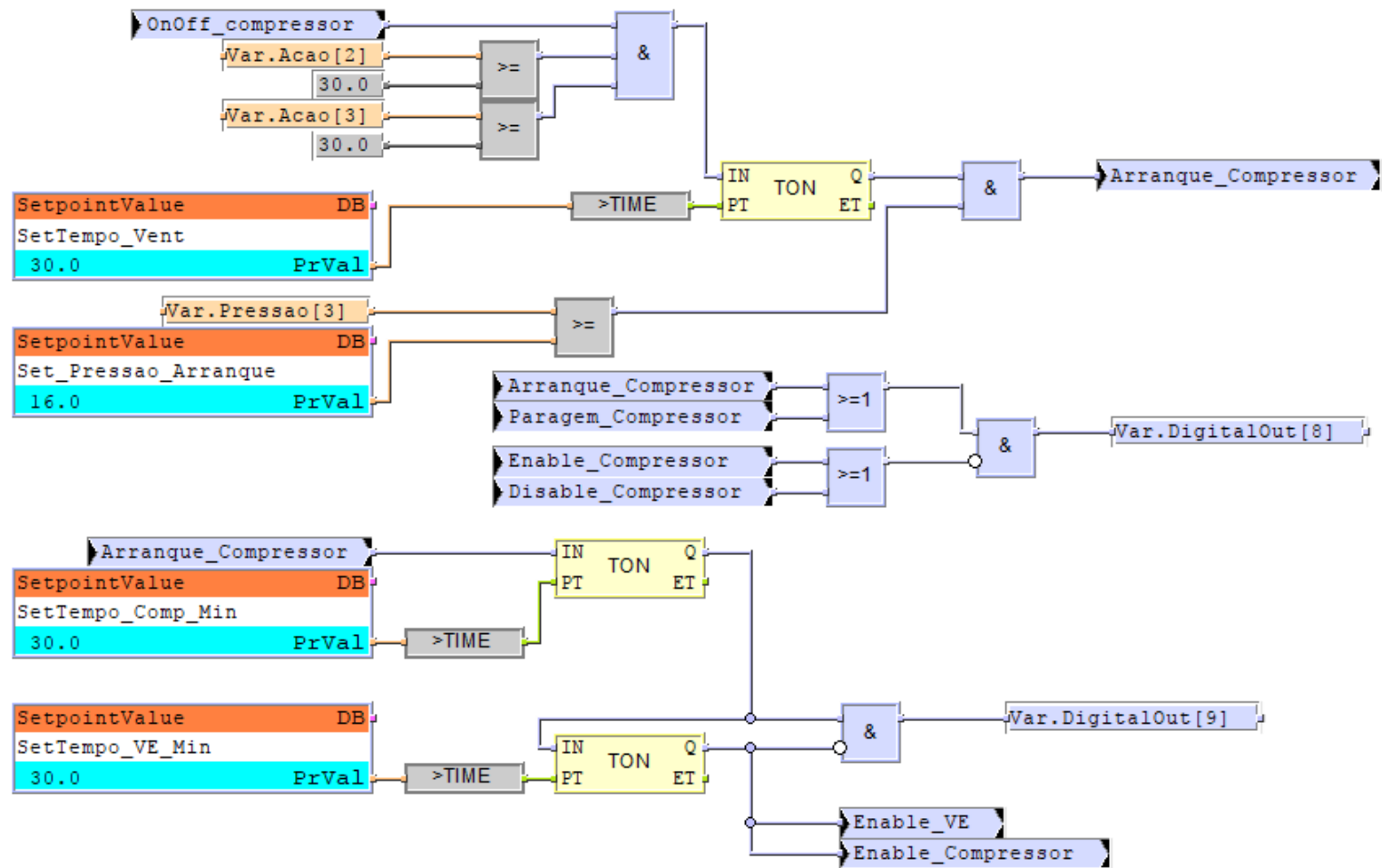


Figura 5.16 – Processo de arranque do compressor e da válvula de expansão

Quando é fornecida a ordem de paragem do compressor, este é colocado na sua capacidade mínima durante 30 segundos enquanto a válvula de expansão aguarda sinal do respetivo controlador. Após os 30 segundos e confirmada a pressão no sensor de baixa pressão, a válvula de expansão e o compressor passam a 0%. O processo de paragem do compressor encontra-se representado na Figura 5.17.

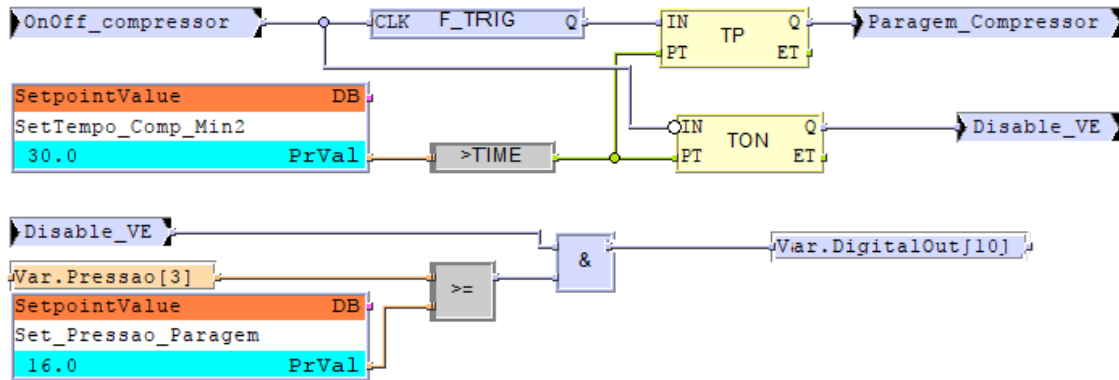


Figura 5.17 – Processo de paragem do compressor e da válvula de expansão

O processo de mudança de ciclo tem início quando é detetada uma mudança do modo de operação de aquecimento para arrefecimento ou de arrefecimento para aquecimento, resultando num sinal positivo da variável “Mudanca\_AqArr” ou da variável “Mudanca\_ArrAq”, respetivamente. Assim que é iniciada a mudança de ciclo, é feita a paragem do compressor e fecho da válvula de expansão e é invertida a posição da válvula de 4 vias, através da variável “Var.DigitalOut[11]” ou da variável “Var.DigitalOut[12]”, consoante a mudança de ciclo. Somente após 90 segundos da paragem do compressor, é permitido o arranque do mesmo e respetivo ciclo invertido.

Este processo de mudança de ciclo encontra-se apresentado na Figura 5.18.

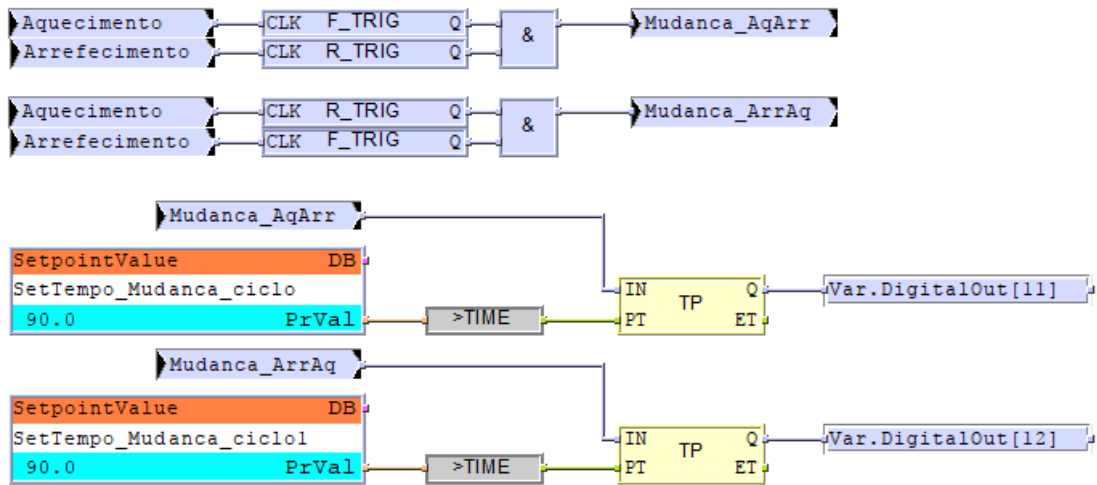


Figura 5.18 – Processo de mudança do ciclo frigorífico

O bloco “Alarmes” (programação apresentada no anexo J) representado na Figura 5.19 apresenta três sinais de entrada que correspondem a falha nos ventiladores, ou falha nos filtros ou falha externa. No caso em estudo não foi utilizada uma falha externa, como por exemplo um alarme de incêndio, devido à inexistência da mesma no sistema. Assim, os sinais de saída do bloco “Var.DigitalOut[4]” e “Var.DigitalOut[5]” designados por “alarme crítico” e “alarme não crítico”, são definidos, respetivamente, pela existência de pelo menos uma falha num ventilador e pelo menos uma falha num filtro.

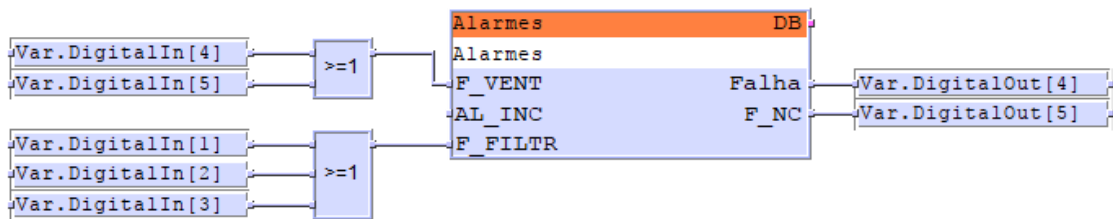


Figura 5.19 – Bloco “Alarmes”

### 5.3. Ensaio experimental

Neste capítulo descrevem-se os ensaios realizados e são apresentados os respetivos resultados. É importante realçar as condições em que foram realizados os ensaios, uma vez que a UTA em estudo encontrava-se instalada num espaço interior, dentro de um pavilhão industrial, sem nenhuma conduta de ligação com o ar exterior, serão expectáveis valores idênticos das temperaturas de retorno e de ar novo. Outro aspeto a ter em conta é que os ensaios foram realizados durante o Verão, ou seja, apenas foi testado o modo de Arrefecimento da UTA.

Antes da realização dos ensaios todos os componentes foram devidamente testados com vista a verificar o seu funcionamento. Tais testes consistiram na verificação e na correção de algumas das ligações inicialmente estabelecidas entre os vários equipamentos da UTA, assim como na verificação da resposta dos sensores de temperatura e ainda na verificação da resposta de cada secção da UTA.

Após as retificações das ligações, permaneceu o problema do compressor não responder aos sinais de controlo impostos. Para a resolução deste problema específico recorreu-se à instalação de um variador de frequência para o compressor (capítulo 4.1) em substituição do hardware de controlo existente. Com este variador e testando uma vez mais o compressor, foi possível colocar o equipamento em funcionamento, ocorrendo depois um novo problema: com o compressor em funcionamento e com a válvula de expansão em diferentes posições não se obtinha produção de frio no modo de arrefecimento. Duas hipóteses possíveis nesta situação foram então testadas, ou falta de gás no circuito ou existência efetiva de uma avaria do equipamento. Recorreu-se assim à introdução do gás R410A para o qual o compressor tinha sido projetado, até que se conseguiu produzir ar frio por parte da bateria de arrefecimento, ficando assim o problema do compressor resolvido.

Outro problema detetado, foi relativo aos sensores de baixa pressão e de alta pressão do ciclo frigorífico, os quais se encontravam trocados. Depois de retificada a instalação dos sensores de pressão, à entrada e à saída do compressor, os ensaios pretendidos puderam ter início.

### 5.3.1. Acerto de parâmetros de controlo

De modo a determinar os parâmetros ideais de controlo dos ventiladores, foram efetuados ensaios por tentativa e erro para diferentes valores de  $k_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ . Em seguida são apresentados os gráficos do comportamento do ventilador ensaiado para um valor de *setpoint* de 4000 m<sup>3</sup>/h. Uma vez que os dois ventiladores são iguais, admite-se que para os mesmos parâmetros de controlo, o comportamento seja idêntico em ambos, portanto nos ensaios realizados somente se utilizou o ventilador de insuflação.

#### Controlador proporcional (P)

Em primeiro lugar, todos os parâmetros de controlo são colocados a zero, exceto a ação proporcional, para a qual será definida um valor em vários ensaios até se obter o comportamento do sistema mais aceitável com apenas este parâmetro de controlo. Foi então analisado o comportamento do ventilador para um controlador com apenas ação proporcional com valor de  $k_p=1$  (Figura 5.20).

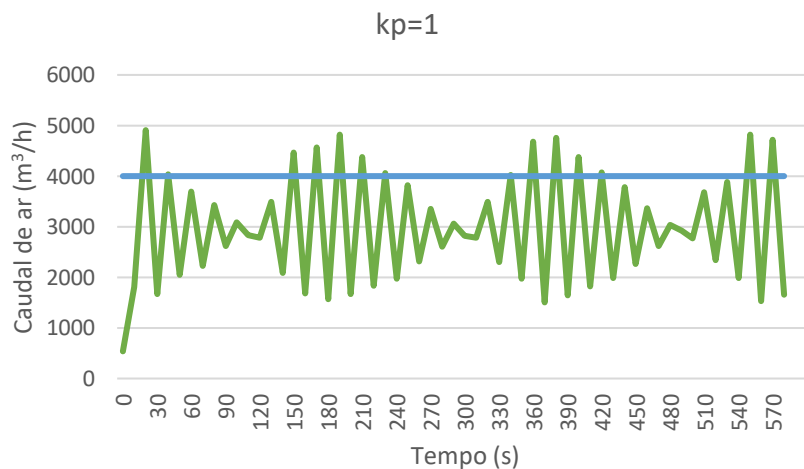


Figura 5.20 – Ensaio 1 – Controlo de ventiladores

Como se pode observar na Figura 5.20, o comportamento dos ventiladores apresenta oscilações de elevada amplitude e instabilidade. Uma vez que o aumento do valor de ganho proporcional provoca o aumento da rapidez da resposta do sistema, será necessário diminuir o valor de  $k_p$ , para diminuir a rapidez da resposta do sistema, isto é, diminuir as

oscilações. Através de um segundo ensaio para um valor de  $k_p=0,5$ , obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.21.

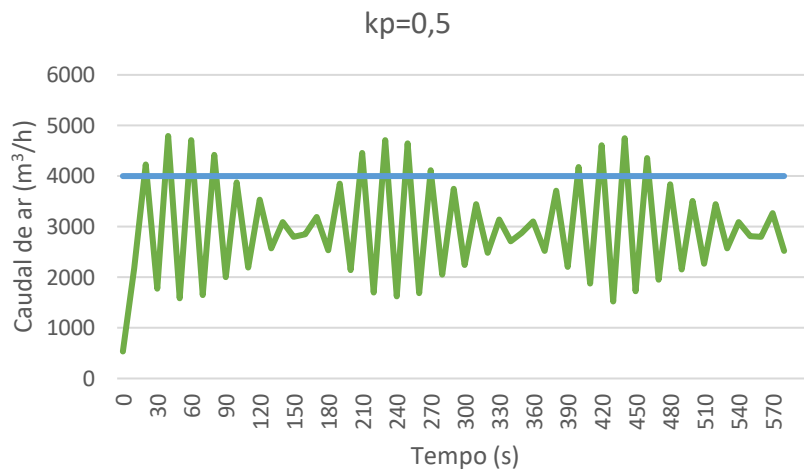


Figura 5.21 – Ensaio 2 -Controlo de ventiladores

Apesar da diminuição do valor de ganho proporcional no segundo ensaio, o ventilador apresenta ainda muitas oscilações pelo que é necessário diminuir ainda mais o valor de  $k_p$ . Um terceiro ensaio foi efetuado para um valor de ganho proporcional,  $k_p=0,05$  (Figura 5.22).

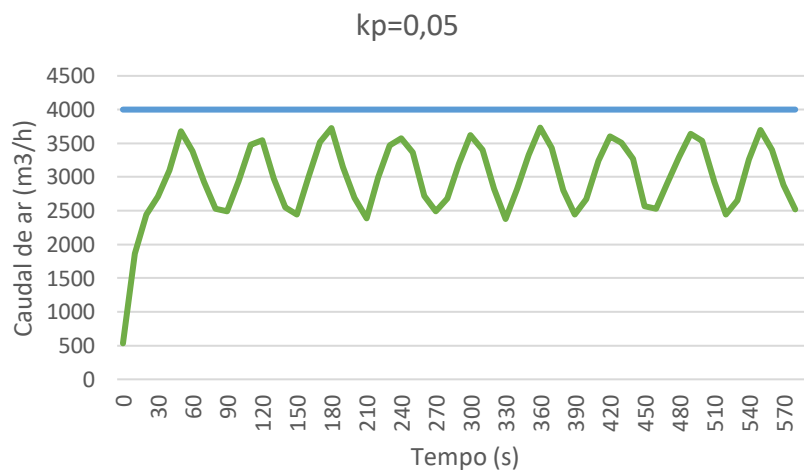


Figura 5.22 - Ensaio 3 – Controlo de ventiladores

Através do gráfico obtido do terceiro ensaio, para valores de  $k_p=0,05$  já se encontram valores de oscilação inferiores aos dos dois primeiros ensaios e mais próximas do desejável, no entanto o valor de *setpoint* não se atinge apenas com ajustes do ganho

proporcional, pelo que o ensaio seguinte consistiu em acrescentar uma ação integral ao controlador para se eliminar o erro estacionário.

O erro estacionário corresponde à diferença entre o valor de *setpoint* e o valor da resposta do sistema, quando o tempo tende para infinito em regime estacionário. No entanto, no caso do ensaio anterior, o sistema apresenta um regime estacionário com oscilações para valores abaixo do valor de *setpoint*.

### Controlador proporcional-integral (PI)

O ensaio 4 (Figura 5.23), consistiu na utilização de um controlador do tipo PI, aplicando o melhor valor de ganho proporcional determinado nos ensaios anteriores e uma ação integral, neste caso, de valor  $T_i=1$ .

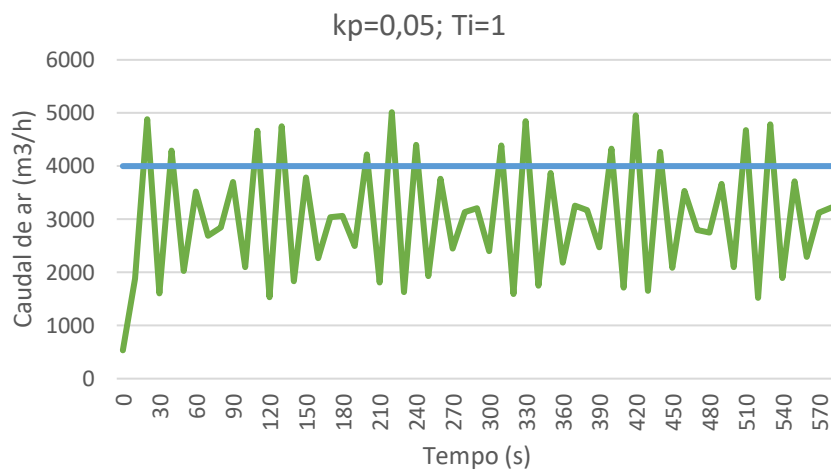


Figura 5.23 – Ensaio 4 - Controlo de ventiladores

Após a adição de uma ação integral ao controlador (Figura 5.23), observa-se um aumento das oscilações do ventilador, contudo o erro estacionário diminui como pretendido. Assim, volta-se a ajustar o parâmetro do ganho proporcional para obter oscilações menores, ou seja, diminuir o valor de  $k_p$ .

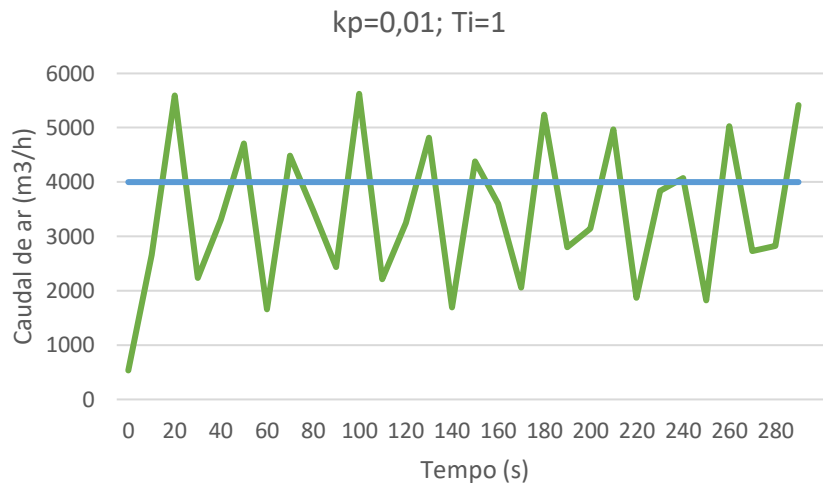


Figura 5.24 – Ensaio 5 - Controlo de ventiladores

No ensaio 5 (Figura 5.24), para valores de  $k_p=0,01$  e  $T_i=1$ , as oscilações continuaram muito elevadas, pelo que se repetiu a operação anterior de diminuir o  $k_p$  no ensaio 6 (Figura 5.25).

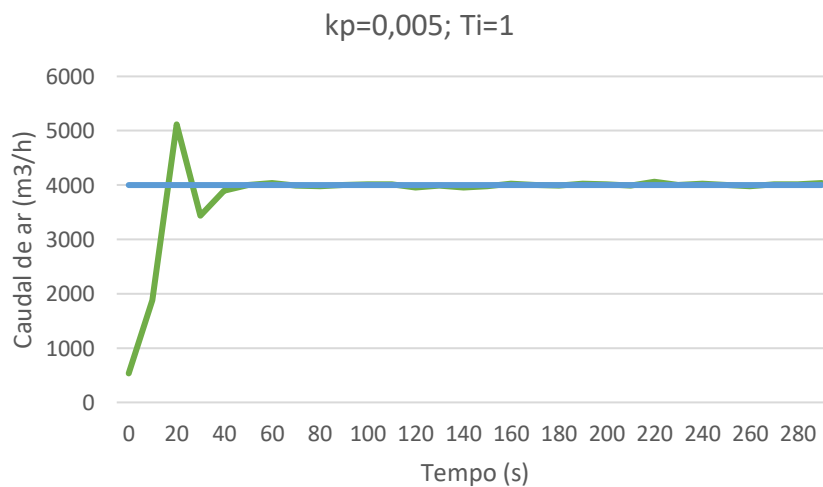


Figura 5.25 – Ensaio 6 - Controlo de ventiladores

Obteve-se então o melhor valor de ganho proporcional ensaiado  $k_p=0,005$  (Figura 5.25). Seguidamente recorreu-se ao aumento do tempo integral, no ensaio 7 (Figura 5.26), com o fim de aumentar o tempo de estabilização do sistema e consequentemente eliminar as oscilações restantes.

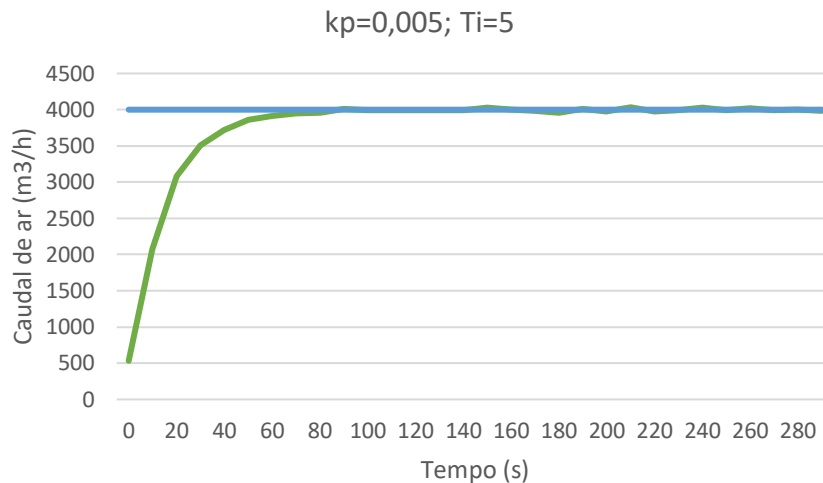


Figura 5.26 – Ensaio 7 - Controle de ventiladores

O comportamento do ventilador obtido no ensaio 7, para valores de  $k_p=0,005$  e  $T_i=5$ , apresenta uma resposta semelhante aos sistemas de 1ª ordem, com pequenas oscilações e um erro estacionário praticamente nulo, tal como pretendido.

### Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Por último, uma vez determinados os valores de  $k_p$  e  $T_i$  para o qual a resposta do sistema o ventilador apresenta um comportamento pretendido, resta apenas determinar o parâmetro que define a ação derivativa, ou seja, o tempo derivativo ( $T_d$ ).

Realizaram-se então, 3 ensaios com alteração do valor de *setpoint* de  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$  para  $2000 \text{ m}^3/\text{h}$  para valores de tempo derivativo igual a 0, 1 e 5, respetivamente no ensaio da Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29, com o objetivo de analisar alterações na resposta do sistema.

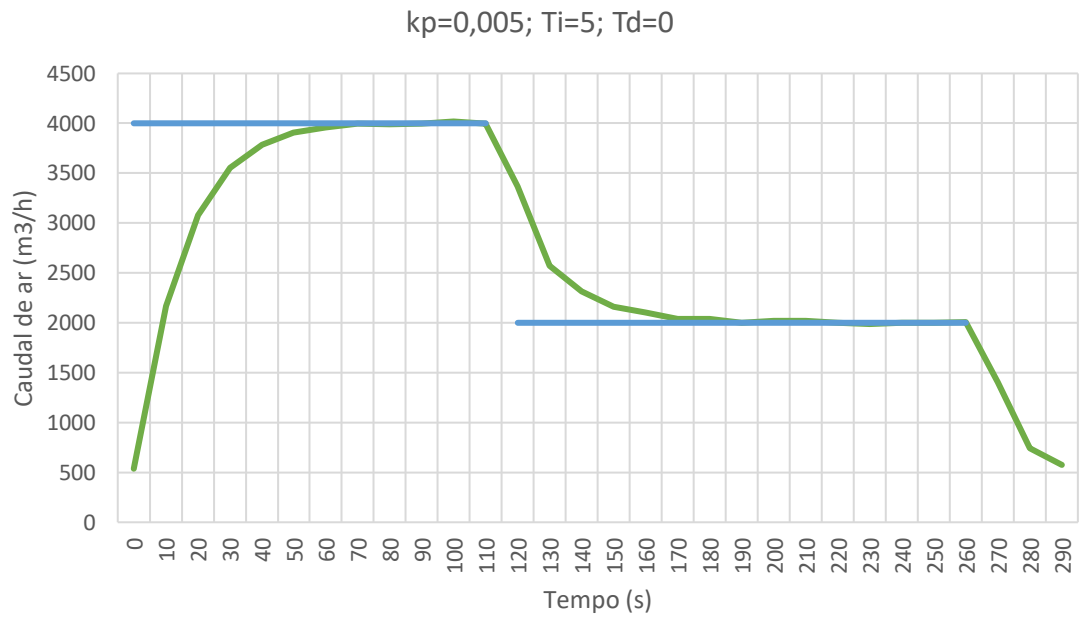


Figura 5.27 – Ensaio 8 - Control de ventiladores

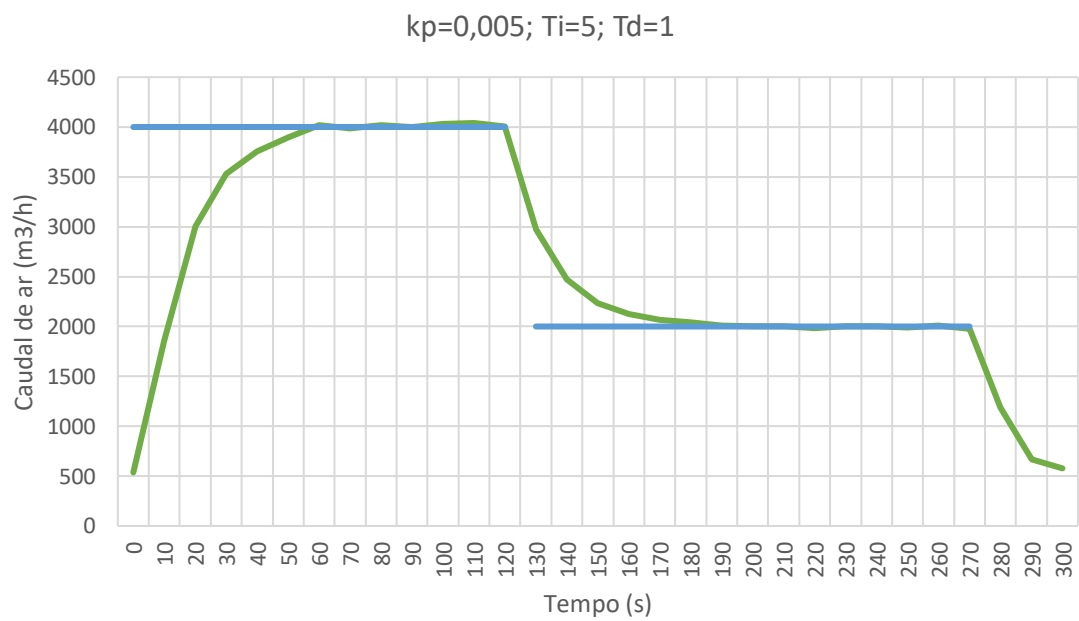


Figura 5.28 – Ensaio 9 - Control de ventiladores

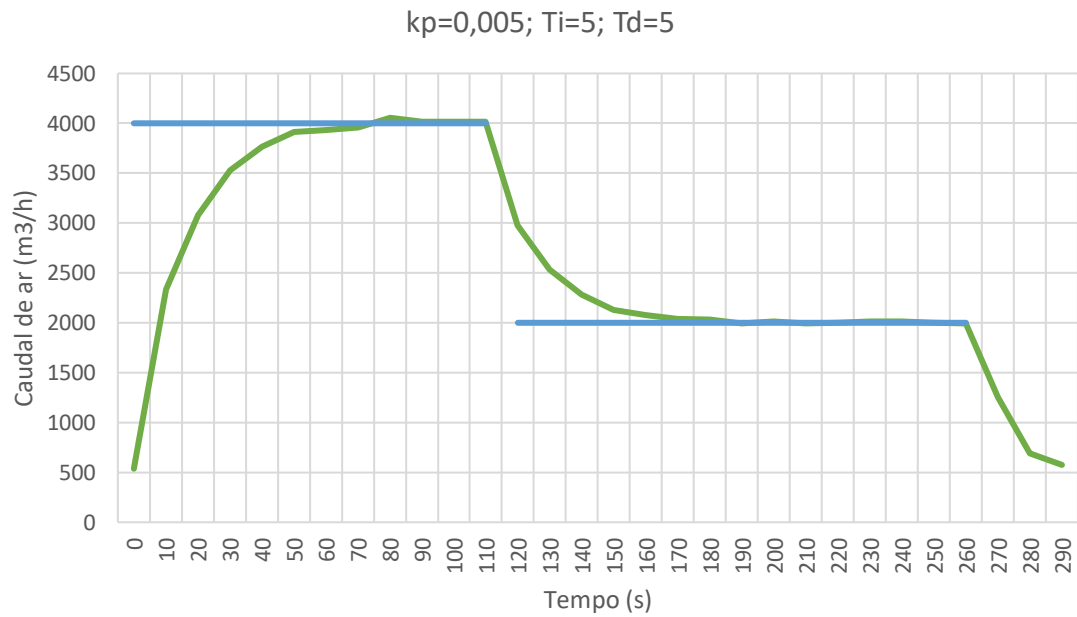


Figura 5.29 – Ensaio 10 - Controlo de ventiladores

O comportamento do ventilador obtido nos ensaios da Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 é praticamente idêntico, pelo que se considerou as diferenças nos valores da ação derivativa insignificantes no controlo deste equipamento. Assim considerou-se que o tempo derivativo a aplicar no controlador dos ventiladores é nulo ( $T_d=0$ ).

Foram então alcançados os seguintes parâmetros de controlo para o controlo dos ventiladores:

- Ganho proporcional:  $k_p = 0,005$ ;
- Tempo integral:  $T_i = 5$ ;
- Tempo derivativo:  $T_d = 0$ .

### 5.3.2. Influência dos Ventiladores

De modo a compreender a influência do trabalho dos ventiladores os ensaios efetuaram-se mantendo o trabalho do compressor e a abertura da válvula de expansão constantes. Uma vez que o compressor e a válvula de expansão neste caso mantêm-se aproximadamente constantes, não há a necessidade de analisar as pressões do gás refrigerante, pelo que se efetuaram dois ensaios para análise das temperaturas, cujos resultados se apresentam nos gráficos da Figura 5.30 e da Figura 5.31.

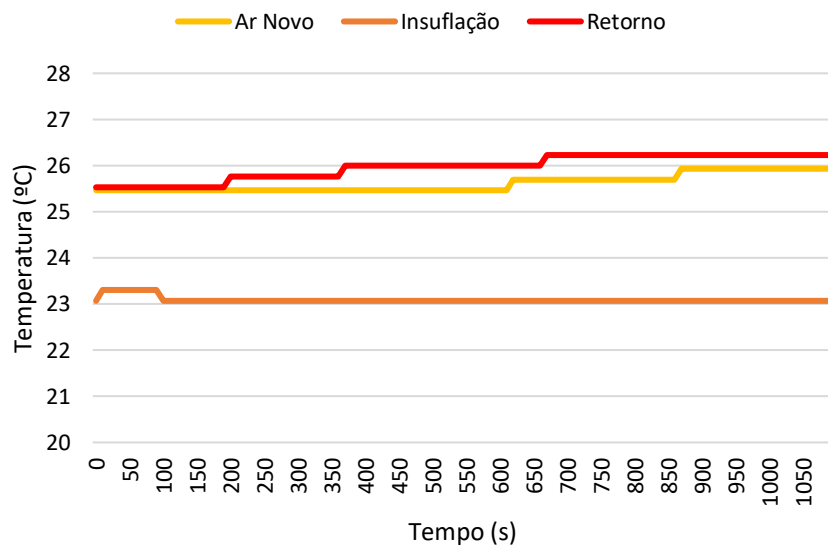


Figura 5.30 – Ensaio 1 – Influência dos ventiladores

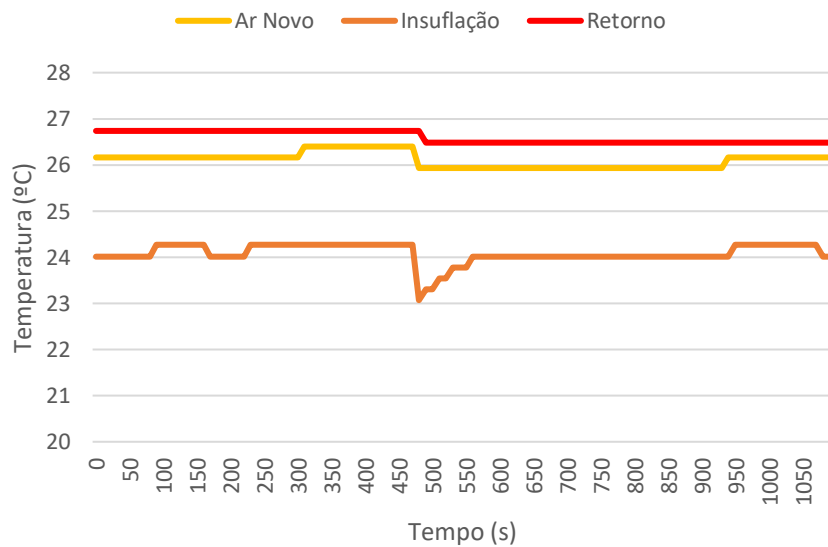


Figura 5.31 – Ensaio 2 – Influência dos ventiladores

As condições dos equipamentos em análise, no ensaio 1 (Figura 5.30), foram os seguintes: trabalho do compressor a 50%, abertura da válvula de expansão a 30% e ventiladores a 50%. No ensaio 2 (Figura 5.31), comparativamente com o ensaio anterior, apenas o trabalho dos compressores foi alterado de 50% para 70%, o que significa que houve um aumento do caudal de ar de 3500 m<sup>3</sup>/h para 5000 m<sup>3</sup>/h. Foram então, determinadas as diferenças entre as temperaturas de ar novo e de insuflação destes ensaios, para observar a influência dos ventiladores (Figura 5.32).

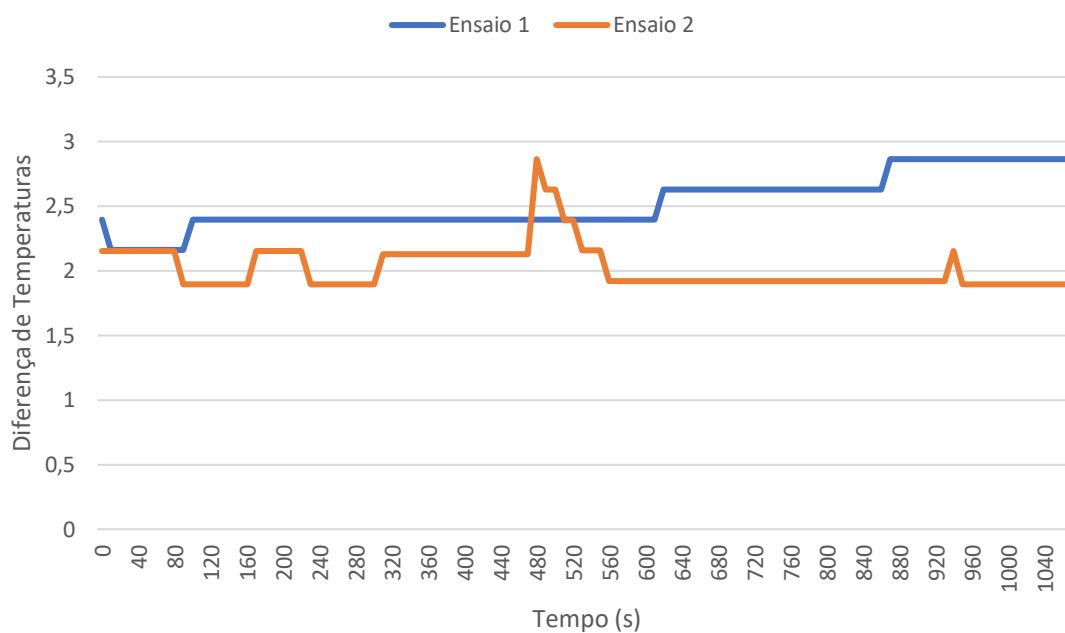


Figura 5.32 – Diferença entre as temperaturas de ar novo e de insuflação para os dois ensaios da influência dos ventiladores

Como se observa na Figura 5.32, no primeiro ensaio atingiu-se em média a uma diferença (positiva) entre a temperatura de ar novo e de insuflação superior à obtida no segundo ensaio. A justificação para este fenómeno, deve-se ao aumento do caudal de ar, o que significa a passagem de uma quantidade de massa superior no mesmo intervalo de tempo, logo como a capacidade de arrefecimento da bateria é constante a temperatura de insuflação tende também a ser superior. Assim, é possível concluir que o aumento do trabalho do ventilador provoca um aumento da temperatura de insuflação, o que pode não ser o desejável visto a UTA se encontrar em modo de arrefecimento.

Relativamente ao ensaio 2 da influência dos ventiladores (Figura 5.31), observa-se uma descida acentuada na temperatura de insuflação, fenómeno este que teve origem numa perturbação no ventilador que provocou a descida do trabalho do ventilador de 70% para 63,5%, no entanto cerca de 30 segundos depois o ventilador estabilizou novamente nos 70% (dados recolhidos durante o ensaio). Deste modo, observa-se também no gráfico da Figura 5.32 um aumento da diferença entre a temperatura de ar novo e de insuflação no momento da perturbação. A diminuição do trabalho do ventilador conduziu então ao aumento desta diferença de temperaturas, corroborando assim, a conclusão anterior que em modo de arrefecimento o aumento do trabalho do ventilador induz o aumento da temperatura de insuflação.

### 5.3.3. Influência da Válvula de Expansão

Com vista à compreensão da influência da válvula de expansão no ciclo frigorífico e consequente influência nas temperaturas a controlar, foram realizados três ensaios com condições de trabalho dos ventiladores e compressor constantes, mas com aberturas da válvula de expansão distintas. Assim, são então em primeiro lugar, interpretados os valores obtidos nos sensores de alta pressão e baixa pressão do compressor para a variação da abertura da válvula de expansão (Figura 5.33). Posteriormente, recorre-se à análise dos valores de temperatura de insuflação para os mesmos ensaios.

O primeiro ensaio da influência da válvula de expansão foi realizado com as condições do ensaio 2 da influência dos ventiladores, ou seja, compressor a 50%, válvula de expansão a 30% e ventiladores a 70%. Nos segundo e terceiro ensaios da influência da válvula de expansão apenas foi alterada a abertura da válvula de expansão para 50% e 90%, respetivamente.

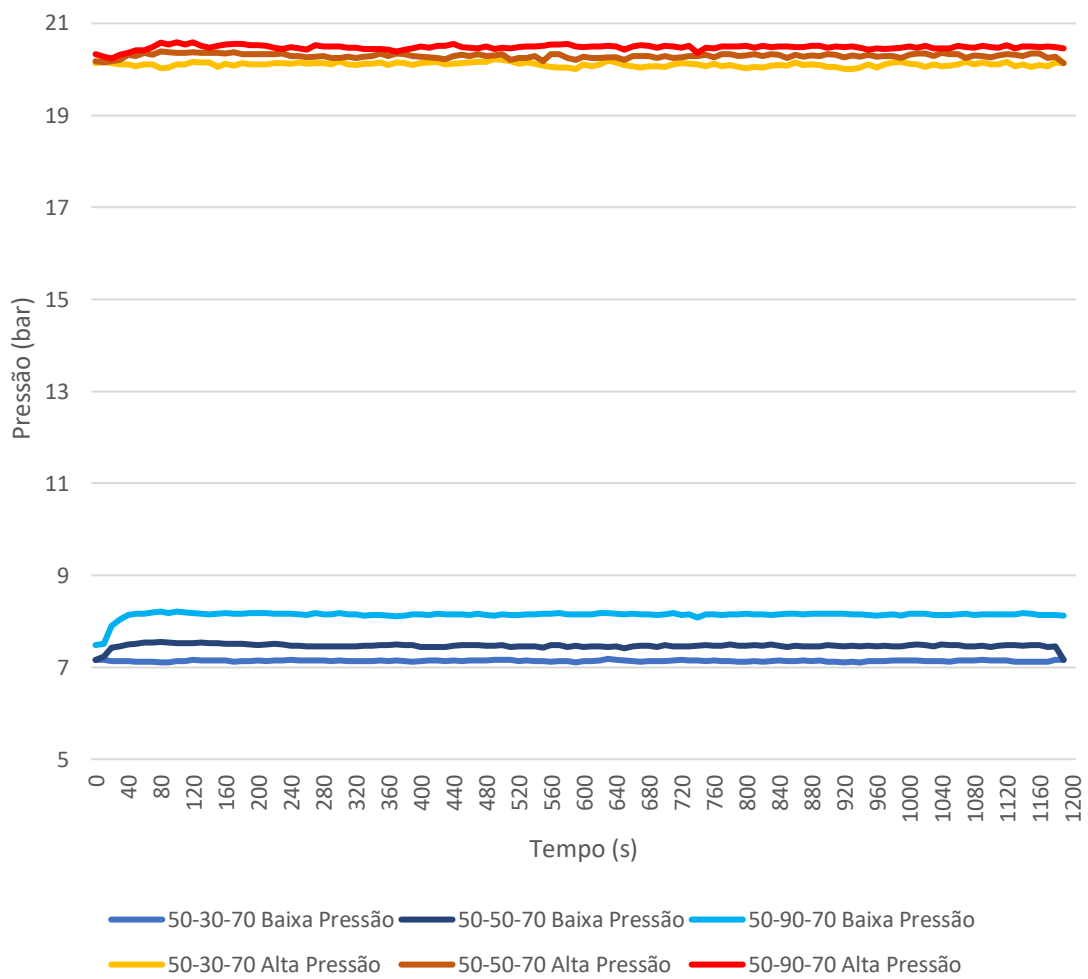


Figura 5.33 – Pressões nos sensores de alta e baixa pressão

Tal como esperado, através da observação dos resultados dos três ensaios da influência da válvula de expansão na Figura 5.33, verifica-se um aumento da pressão do gás refrigerante no sensor de baixa pressão situado à entrada do compressor em função do aumento da abertura da válvula de expansão. Ainda é possível observar um ligeiro aumento da pressão à saída do compressor (sensor alta pressão), uma vez que o trabalho do compressor se manteve constante e houve o aumento da baixa pressão.

Para estes 3 ensaios foram também recolhidos os valores de temperatura de insuflação, cujos resultados são apresentados na Figura 5.34.

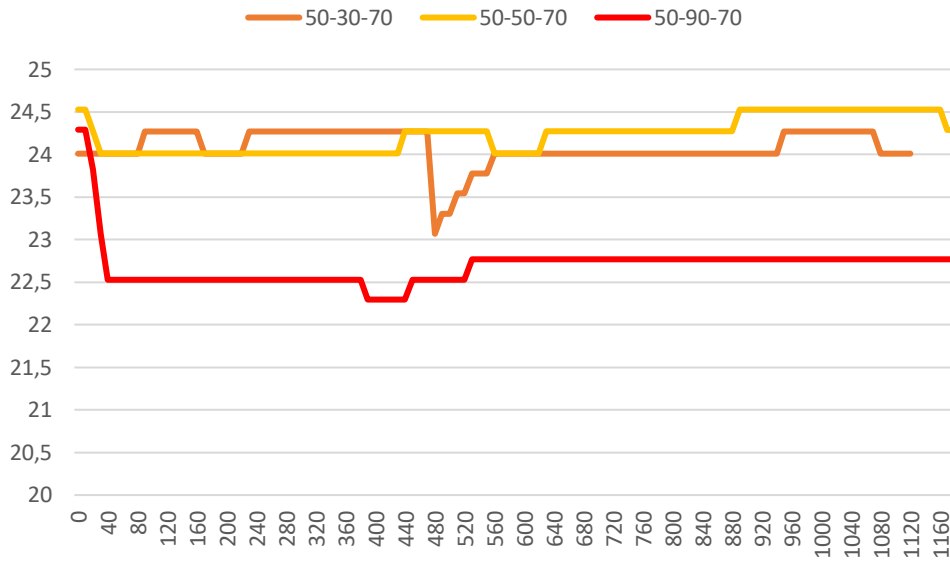


Figura 5.34 – Temperatura de Insuflação nos ensaios de influência da válvula de expansão

Analisando os valores de temperatura da Figura 5.34, observa-se que os valores de temperatura de insuflação encontram-se aproximadamente entre 24 e 24,5°C, quando o sistema se encontra em equilíbrio, para os ensaios com a válvula de expansão a 30% e a 50%, considera-se então que a diferença não é significativa entre estes dois casos. No entanto, após o aumento da abertura de válvula de expansão para 90%, observa-se a diminuição da temperatura de insuflação com uma diferença de aproximadamente 2°C, a qual permite compreender melhor a influência da válvula na temperatura de insuflação.

Chega-se à conclusão que a influência da válvula de expansão na temperatura de insuflação deve-se à alteração da pressão no circuito do gás refrigerante. Assim, quanto maior a abertura da válvula de expansão, maior será a pressão à entrada do compressor e menor será a temperatura de insuflação, neste caso em que a UTA se encontra no modo de arrefecimento.

### 5.3.4. Influência do compressor

O compressor é um dos principais constituintes do sistema de aquecimento e arrefecimento, como tal o seu comportamento foi analisado em diferentes ensaios, tal como foi efetuado para a válvula de expansão, com o objetivo de compreender a influência do ar de insuflação nas temperaturas da UTA. Tal como nos ensaios anteriores, a recolha de dados foi efetuada durante o Verão, ou seja, com a UTA no modo de arrefecimento.

Os dados do primeiro ensaio deste tópico, corresponde aos dados recolhidos do último ensaio da influência da válvula de expansão, ou seja, com o compressor a 50%, a abertura da válvula de expansão a 90% e os ventiladores a 70%. No segundo ensaio para esta abordagem, foi apenas alterado o funcionamento do compressor de 50% para 70%.

Para estes dois ensaios foram recolhidos os dados de temperatura de ar novo, do ar de insuflação e do ar de retorno e também das pressões à entrada e saída do compressor, baixa pressão e alta pressão (Figura 5.35 e Figura 5.36).

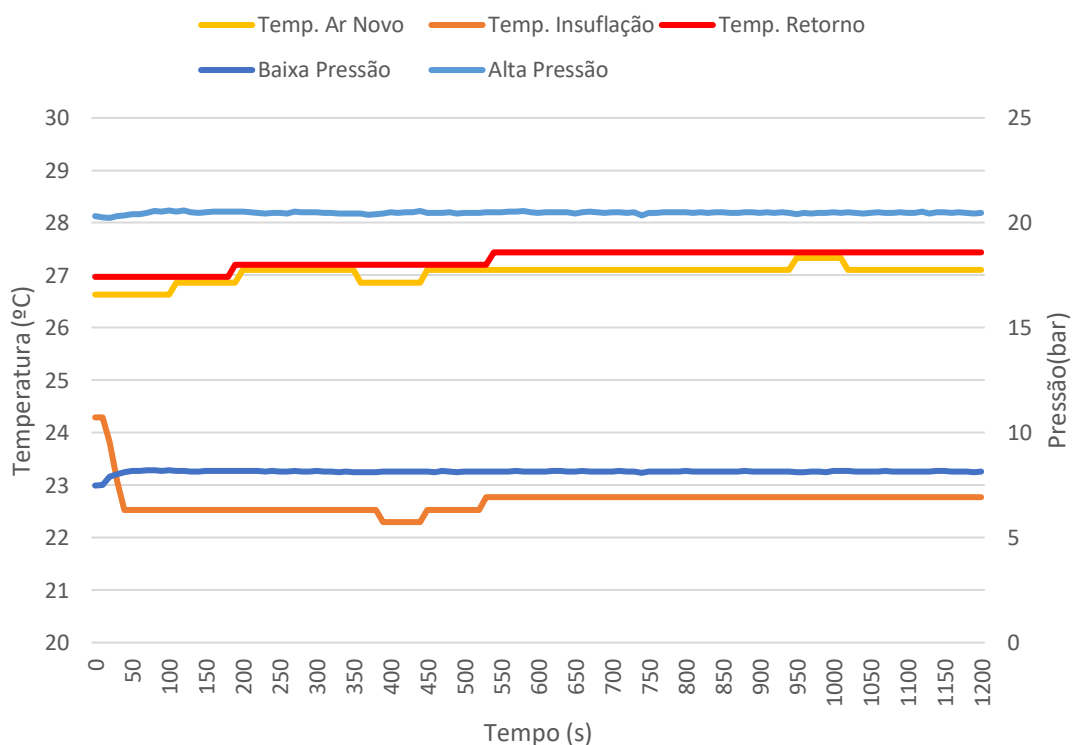


Figura 5.35 – Ensaio 1 da influência do compressor

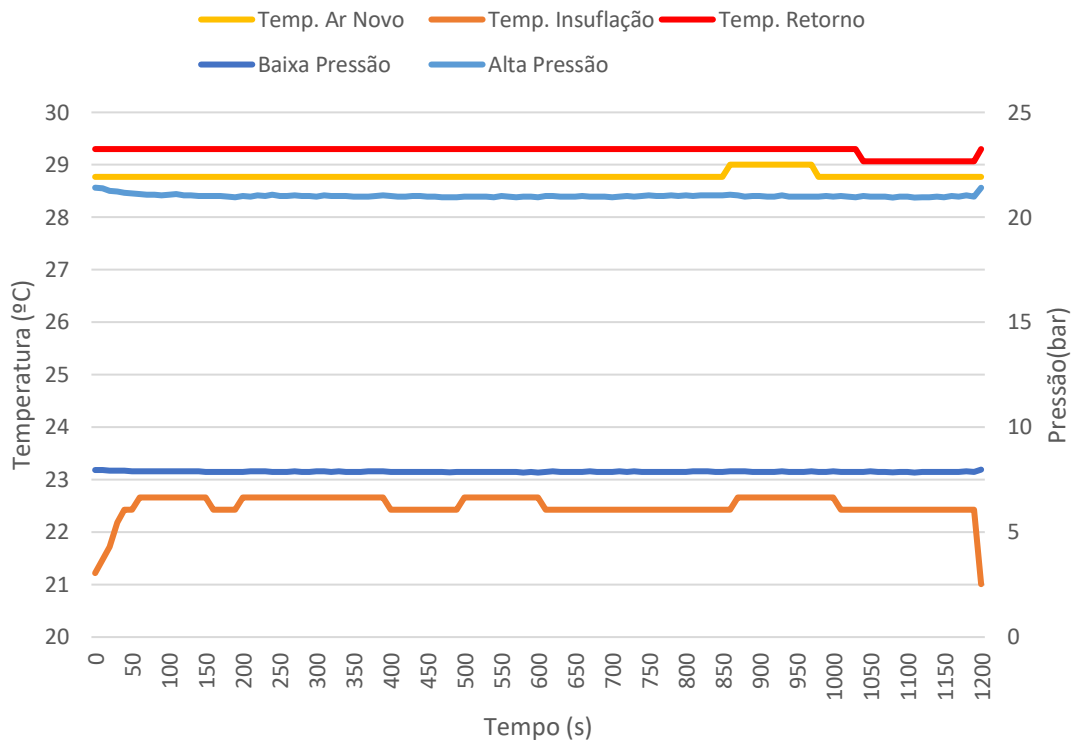


Figura 5.36 – Ensaio 2 da influência do compressor

Analisando em primeiro lugar as pressões recolhidas nestes dois ensaios, verifica-se que a baixa pressão se mantém, em ambos os ensaios, com valores de cerca de 8 bar, enquanto que a alta pressão tem um ligeiro aumento de 20,5 bar para 21 bar do primeiro para o segundo ensaio, o que pode ser justificado pelo aumento do trabalho do compressor de 50% para 70%.

Analisando as temperaturas dos gráficos da Figura 5.35 e Figura 5.36, verifica-se que a temperatura de insuflação apresenta valores entre 22°C e 23°C, por motivos de cálculo considerou-se 22,5°C para estas temperaturas de ar de insuflação. Quanto à temperatura de ar novo, apresentou valores próximos de 27°C no primeiro ensaio e próximos de 29°C no segundo ensaio, o que resulta numa diferença entre a temperatura de ar novo e de ar de insuflação de 6,5°C e 4,5°C, respetivamente.

Poderá assim concluir-se que quanto maior for o trabalho do compressor, mantendo a abertura da válvula de expansão a 90% e os ventiladores a 70%, a diferença (positiva) entre a temperatura de ar novo e a temperatura de insuflação aumenta.

## 5.4. Eficiência energética

Com vista à melhoria da eficiência energética a programação desenvolvida estabelece uma ligação lógica entre os controladores aplicados e os ventiladores, o recuperador de calor, o compressor e a válvula de expansão.

Como referido no capítulo 3.3, o controlo individual de cada equipamento apenas favorece a eficiência energética do mesmo, sem ter em conta os consumos por parte dos outros equipamentos. O controlo conjugado dos diferentes equipamentos com o mesmo objetivo de atingir uma determinada temperatura de insuflação (*setpoint*) definida pelo utilizador, permite alcançar mais rapidamente o *setpoint* e manter o sistema estabilizado nesse valor.

Embora os ensaios efetuados não permitam a determinação de valores de consumos energéticos de cada componente, pode afirmar-se por dedução lógica que se obtém melhor eficiência energética quanto menor o consumo energético de cada componente.

Assim, e conforme os resultados apresentados, poderá concluir-se que é possível melhorar a eficiência energética da UTA controlando os seus equipamentos com recurso ao algoritmo e programação desenvolvidos, em particular o compressor, reduzindo o esforço, logo o seu consumo energético, uma vez atingida a temperatura pretendida.

## Capítulo 6. Conclusões e Trabalho Futuro

No decorrer do estágio, como anteriormente referido, surgiram algumas dificuldades relativas ao funcionamento da UTA com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, em estudo, descritas no capítulo 5.3.

Tais dificuldades práticas iniciais, foram ultrapassadas com recurso a testes e verificações, após as quais foram realizados os ensaios descritos nos sub-capítulos 5.3.1 a 5.3.4. Os resultados dos ensaios permitiram testar o algoritmo de controlo e a programação desenvolvidos especificamente durante este trabalho final de mestrado para a UTA, assim como testar o funcionamento da própria UTA, podendo afirmar-se que foram alcançados os objetivos definidos (capítulo 1).

Tal como referido no capítulo 5.4 quanto ao aumento da eficiência energética da UTA, pode concluir-se que se consegue controlando de forma conjugada o trabalho dos seus equipamentos minimizando assim o consumo energético para atingir uma dada temperatura pretendida.

Relativamente à influência dos ventiladores, da válvula de expansão e do compressor sobre o funcionamento da UTA, concluiu-se que se obtém um aumento na diferença entre a temperatura de ar novo e de insuflação nas seguintes situações:

- Quanto menor o caudal de ar gerado pelos ventiladores, mantendo os valores da válvula de expansão e do compressor;
- Quanto maior a abertura da válvula de expansão, mantendo os valores dos ventiladores e do compressor;
- Quanto maior o trabalho do compressor, mantendo os valores dos ventiladores e da válvula de expansão.

Uma vez que os ensaios foram realizados, no modo de arrefecimento, durante o verão, sugere-se como proposta de trabalho futuro, a realização dos ensaios de influência da válvula de expansão e do compressor na temperatura de insuflação durante o inverno com a UTA no modo de aquecimento, de forma a confirmar se os resultados são compatíveis com as conclusões aqui apresentadas.

Tendo em conta que o algoritmo e a programação foram desenvolvidos para aplicação generalizada em UTAs com sistema de aquecimento/arrefecimento integrado, assim outra proposta de trabalho futuro é a sua aplicação e teste em diferentes UTAs (outros modelos, outros fabricantes) com este tipo de sistema integrado.

## Capítulo 7. Referências Bibliográficas

- [1] Y. M. Lee, R. Horesh, and L. Liberti, “Optimal HVAC control as demand response with on-site energy storage and generation system,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2106–2111, 2015.
- [2] B. Argüello-Serrano and M. Vélez-Reyes, “Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 56–63, 1999.
- [3] Z. Huaguang and L. Cai, “Decentralized nonlinear adaptive control of an HVAC system,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 32, no. 4, pp. 493–498, 2002.
- [4] C. Guo, Q. Song, and W. Cai, “Supply air temperature control of AHU with a cascade control strategy and a SPSA based neural controller,” *Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 2243–2248, 2005.
- [5] H. N. Fakhruddin, S. A. Ali, M. Muzafar, and S. Azam, “Fuzzy Logic in HVAC for Human Comfort,” vol. 7, no. 6, pp. 83–86, 2016.
- [6] A. Attia, S. Rezek, and A. Saleh, “Fuzzy logic control of air-conditioning system in residential buildings,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 54, no. 3, pp. 395–403, 2015.
- [7] H. Moradi, H. Setayesh, and A. Alasty, “PID-Fuzzy control of air handling units in the presence of uncertainty,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 109, pp. 123–135, 2016.
- [8] K. Mařík, J. Rojíček, P. Stluka, and J. Vass, “Advanced HVAC Control: Theory vs. Reality,” *Ifac*, pp. 3108–3113, 2011.
- [9] P. Ferreira and S. Silva, “Model Based Predictive Control of HVAC Systems for Human Thermal Comfort and Energy Consumption Minimisation,” *IFAC Proc. Vol.*, no. APRIL, pp. 236–241, 2012.
- [10] A. Ruano *et al.*, “PVM-based intelligent predictive control of HVAC systems,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 5, pp. 371–376, 2016.
- [11] F. Belic, Z. Hocenski, and D. Sliskovic, “HVAC control methods - a review,” *2015 19th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput.*, pp. 679–686, 2015.
- [12] Š. Kozák, “State-of-the-art in Control Engineering,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2014.

- [13] S. Bennett, “A brief history of automatic control,” *Control Syst. IEEE*, vol. 16, no. 3, pp. 17–25, 1996.
- [14] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth., vol. 17. Pearson, 2010.
- [15] N. S. Nise, “Control Systems Engineering,” vol. Seventh Ed, p. 943, 2015.
- [16] R. McDowall, S. T. Taylor, R. Montgomery, and American Society of Heating; Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Fundamentals of HVAC control systems*. Elsevier, 2008.
- [17] M. Mendes, *Autómatos Programáveis, Transparências da unidade curricular: Programação de Autómatos*. ISEL, 2014.
- [18] U. Iru *et al.*, “Delta Programmable Logic Controller DVP Series,” *Delta Electron. Inc*, 2016.
- [19] Scheinder-electric, “Guide to Open Protocols In Building Automation,” *Scheinder-electric*, 2015.
- [20] S. K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. 2000.
- [21] The ZIEHL-ABEGG Company, “Centrifugal Fans - Main Catalogue Part1,” 2013.
- [22] EN 1751, “Ventilation for buildings – Air terminal devices – Aerodynamic testing of damper and valves,” 2014.
- [23] Trox Gmbh, “Multileaf dampers, Attenuators, External weather louvres,” 2014.
- [24] Hoval Enventus, “Rotary heat exchangers,” 2016.
- [25] Hoval Enventus, “Plate heat exchangers,” 2016.
- [26] V. Ferreira, F. Lamas, B. Cardoso, A. R. Gaspar, and J. Baranda, “An overview of the refrigeration facilities in Portuguese agro-food industries : energy consumption and refrigerants,” 2014.
- [27] O. Liegeois and E. Winandy, “Scroll Compressors for Dedicated Heat Pumps : Development and Performance Comparison,” *Int. Compress. Eng. Conf.*, 2008.
- [28] EN 779, “Particulate air filters for general ventilation,” 2012.
- [29] EN 1822, “High Efficiency Air Filters (EPA, HEPA e ULPA),” 2009.
- [30] Siemens, “Sensores de Pressão - QBE9002-P,” 2016.
- [31] Spectrum Sensors & Controls - Inc., “Resistance Temperature Detectors (RTDs),” *Digikey*, 2010.

# Anexos

Anexo A – Desenho da Unidade de Tratamento de Ar

Anexo B – Especificação do Controlador POL963.00

Anexo C – Especificação da Expansão POL955.00

Anexo D – Quadro Elétrico da UTA

Anexo E – Programação desenvolvida – bloco “AO\_IO”

Anexo F – Programação desenvolvida – bloco “AO\_Logica”

Anexo G – Programação desenvolvida – bloco “Manager”

Anexo H – Programação desenvolvida – bloco “Modo\_operacao”

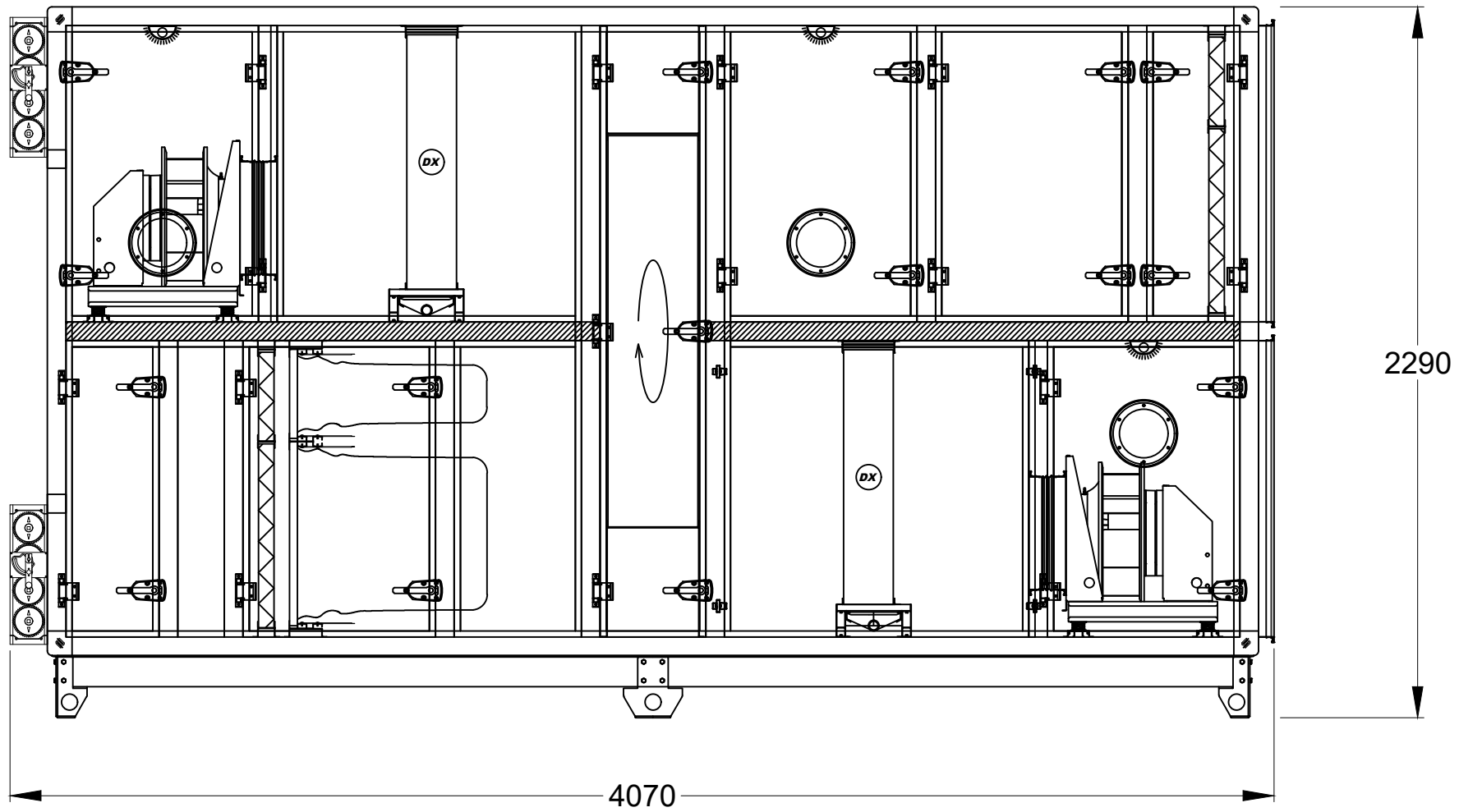
Anexo I – Programação desenvolvida – bloco “Manager\_compressor”

Anexo J – Programação desenvolvida – bloco “Alarmes”



# Anexo A

(Desenho da Unidade de Tratamento de Ar)

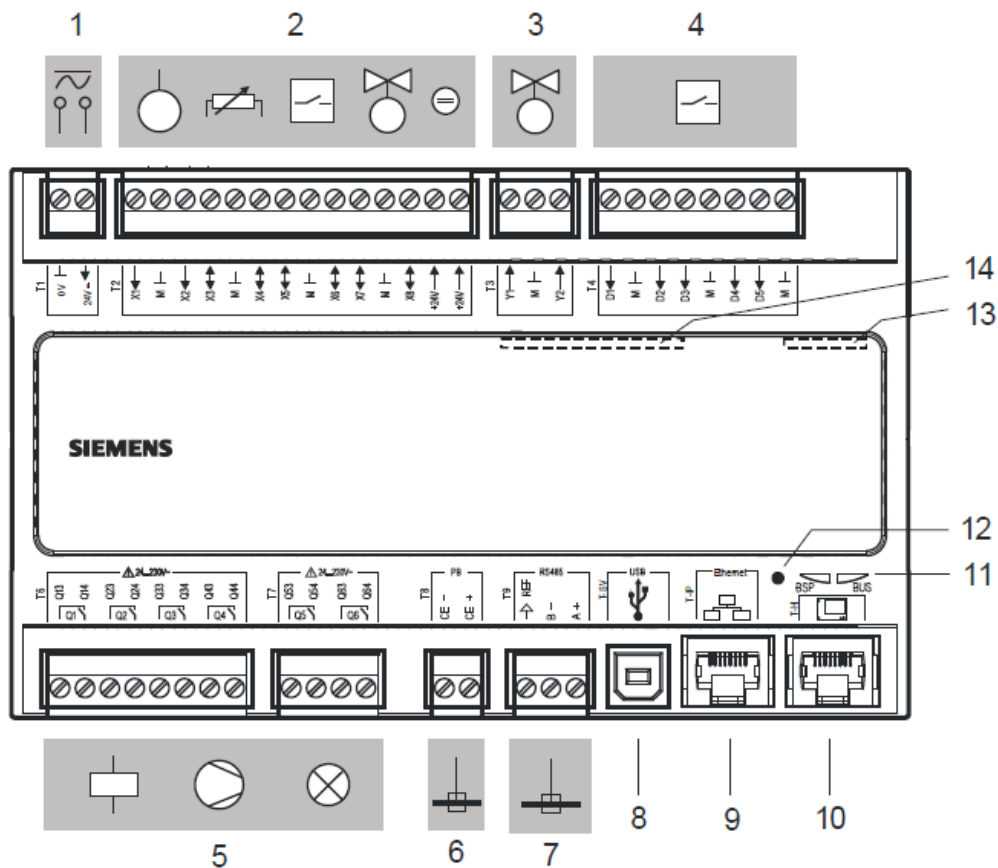


Desenhado	João Nunes	Designação	Desenho Unidade de Tratamento de Ar	
Data	Setembro de 2017	Trabalho Final de Mestrado		
Escala	1:20	Desenho nº	1	A4

# Anexo B

(Especificação do Controlador POL968.00)

## Controlador Siemens POL638.00

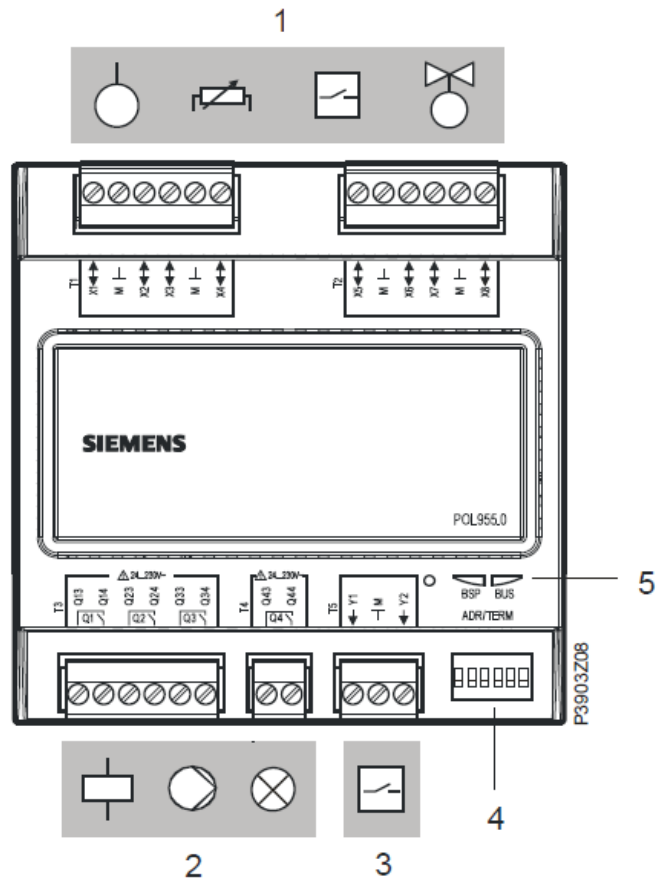


	<b>Simbologia</b>	<b>Função</b>
<b>1</b>	T1: 0V, 24V	Alimentação de 24V com corrente AC/DC
<b>2</b>	T2: X1, X2 X3... X8 +24V	2 Sinais de entrada universais 6 Sinais de entrada/saída universais 2 sinais de 24V DC para sensores
<b>3</b>	T3: Y1, Y2	2 Saídas analógicas DC 0...10V/2mA
<b>4</b>	T4: D1... D5	5 Sinais de entrada digital 24V DC
<b>5</b>	T6: Q1... Q4 T7: Q5, Q6	6 Sinais de saída 24V AC...230V AC
<b>6</b>	T8: CE-, CE+	Comunicação Processbus (PB)
<b>7</b>	T9: A+, B-	Comunicação Modbus (RS485)
<b>8</b>	T-SV	Ligação standard USB (tipo B)
<b>9</b>	T-IP	Ligação com cabo RJ45 à Ethernet (TCP/IP)
<b>10</b>	T-HI	Ligação com cabo RJ45 a um HMI (RS485)
<b>11</b>	BSP, BUS	Luzes LED indicadora do estado do controlador (BSP) e do estado de comunicação (BUS)
<b>12</b>	–	Botão para iniciar upgrade/update da aplicação
<b>13</b>	–	Ligação com cabo RJ45 a Modem
<b>14</b>	–	Ranhura para entrada de cartões SD

# Anexo C

(Especificação da Expansão POL955.00)

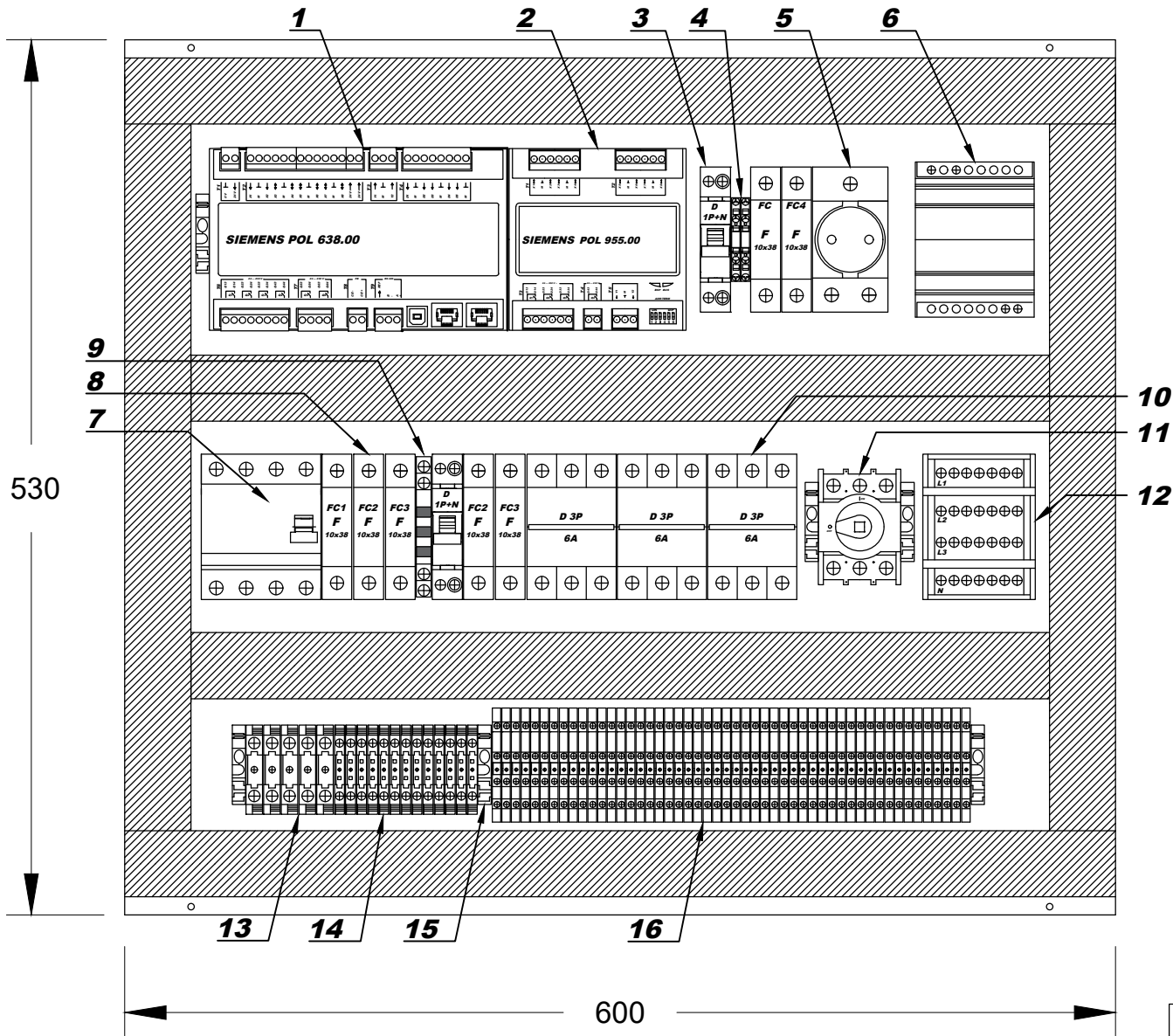
## Expansão Siemens POL955.00



	<b>Simbologia</b>	<b>Função</b>
<b>1</b>	T1: X1... X8	8 Sinais de entrada/saída universais
<b>2</b>	T2: Q1... Q4	4 Sinais de saída 24V AC...230V AC
<b>3</b>	T3: Y1, Y2	2 Saídas analógicas DC 0...10V/2mA
<b>4</b>	ADR/TERM	5 Interruptores DIP para definir endereço da expansão 1 Interruptor DIP para definir a última expansão
<b>5</b>	BSP, BUS	Luzes LED indicadora do estado do controlador (BSP) e do estado de comunicação (BUS)

# Anexo D

(Quadro Elétrico da UTA)



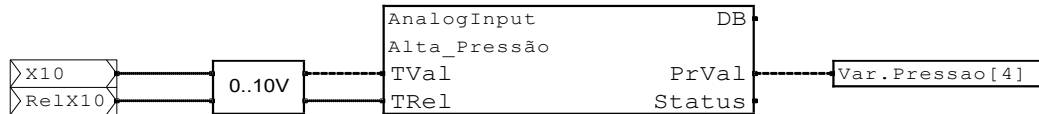
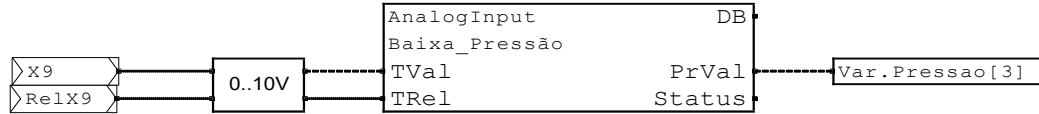
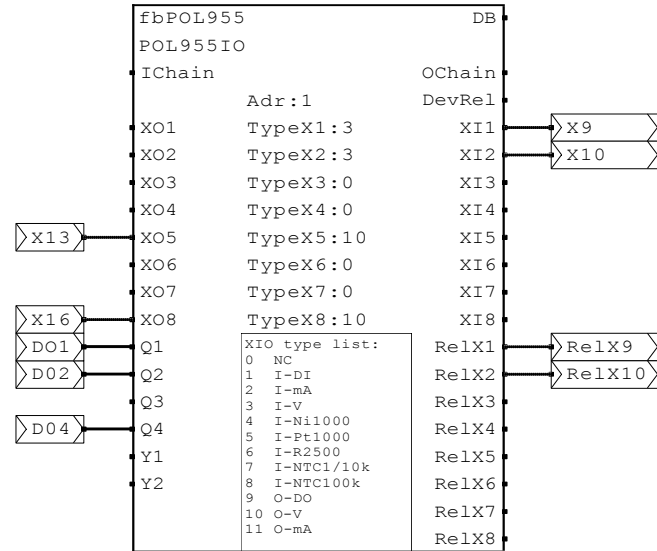
Nº	Designação	Quantidade
1	Siemens POL 638.00	1
2	Siemens POL 955.00	1
3	Disjuntor - 1 Polo e Neutro	2
4	Bornes duplos 2.5mm <sup>2</sup> (ZDU)	2
5	Tomada Monofásica	1
6	Transformador 230V/24V	1
7	Disjuntor de corte - 4 Polos	1
8	Fusível	7
9	LED's	1
10	Disjuntor - 3 Polos (6A)	3
11	Betoneira	1
12	Barramento (100A)	1
13	Bornes Simples 10mm <sup>2</sup>	5
14	Bornes Simples 4mm <sup>2</sup>	13
15	Batente	6
16	Bornes duplos 2.5mm <sup>2</sup> (WDU)	50

Desenhado	João Nunes	Designação	Quadro Elétrico da UTA	
Data	Setembro de 2017	Trabalho Final de Mestrado		
Escala	1:4	Desenho nº	2	A4

# Anexo E

(Programação Desenvolvida – bloco “AO\_IO”)

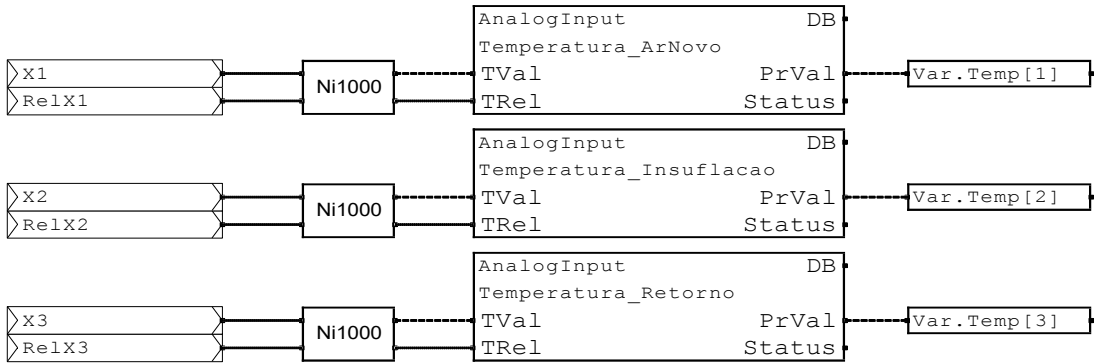
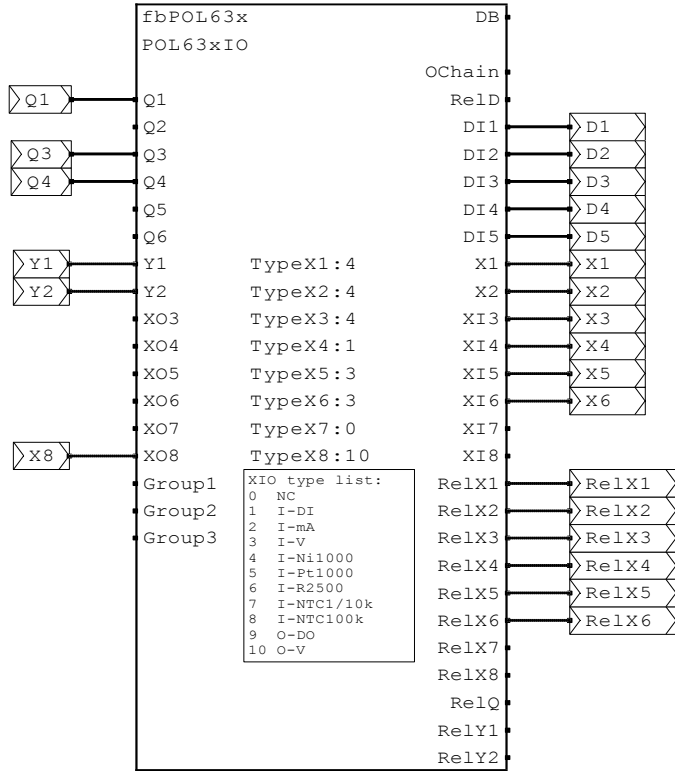
EXPANSÃO - POL955.00



Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved

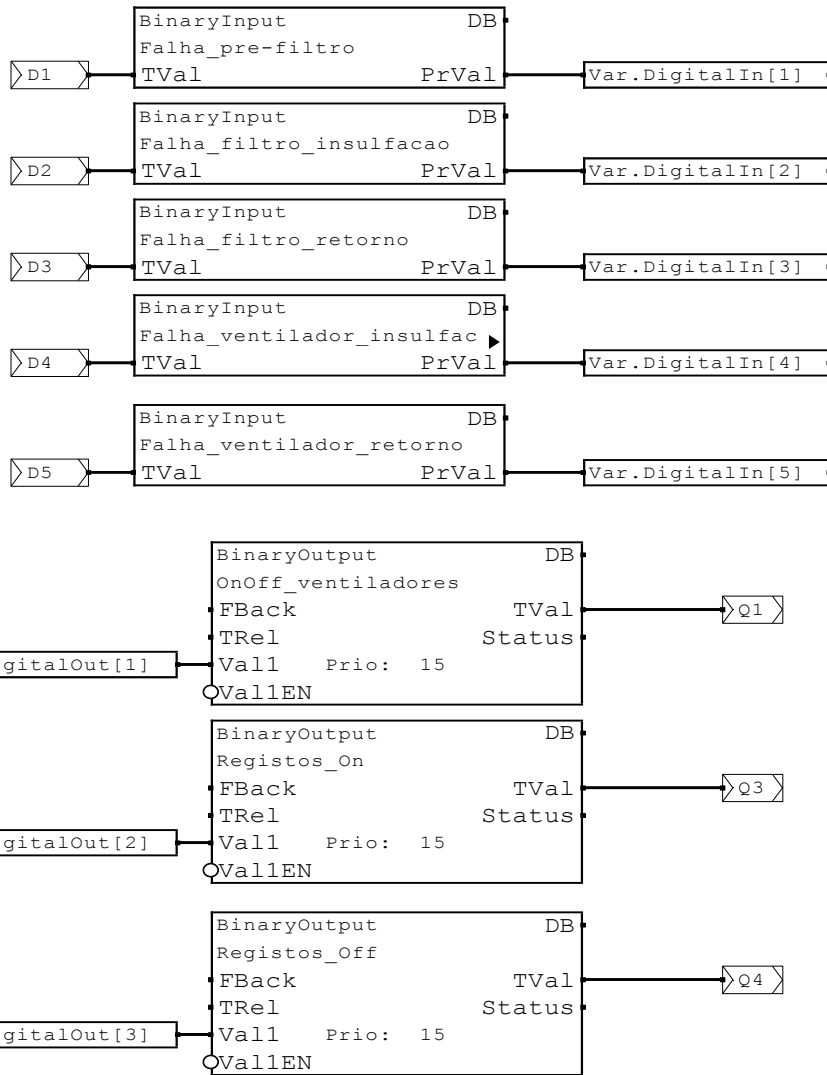
3	190717	João*	Date	01-03-2017								Version	Rev
2	270717	João*	Desig	João Tiago								Coordinates	(A)/0
1	040817	João*	Test									Sheet	1
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by					0001	of 5 Sh

CONTROLADOR - POL638.00



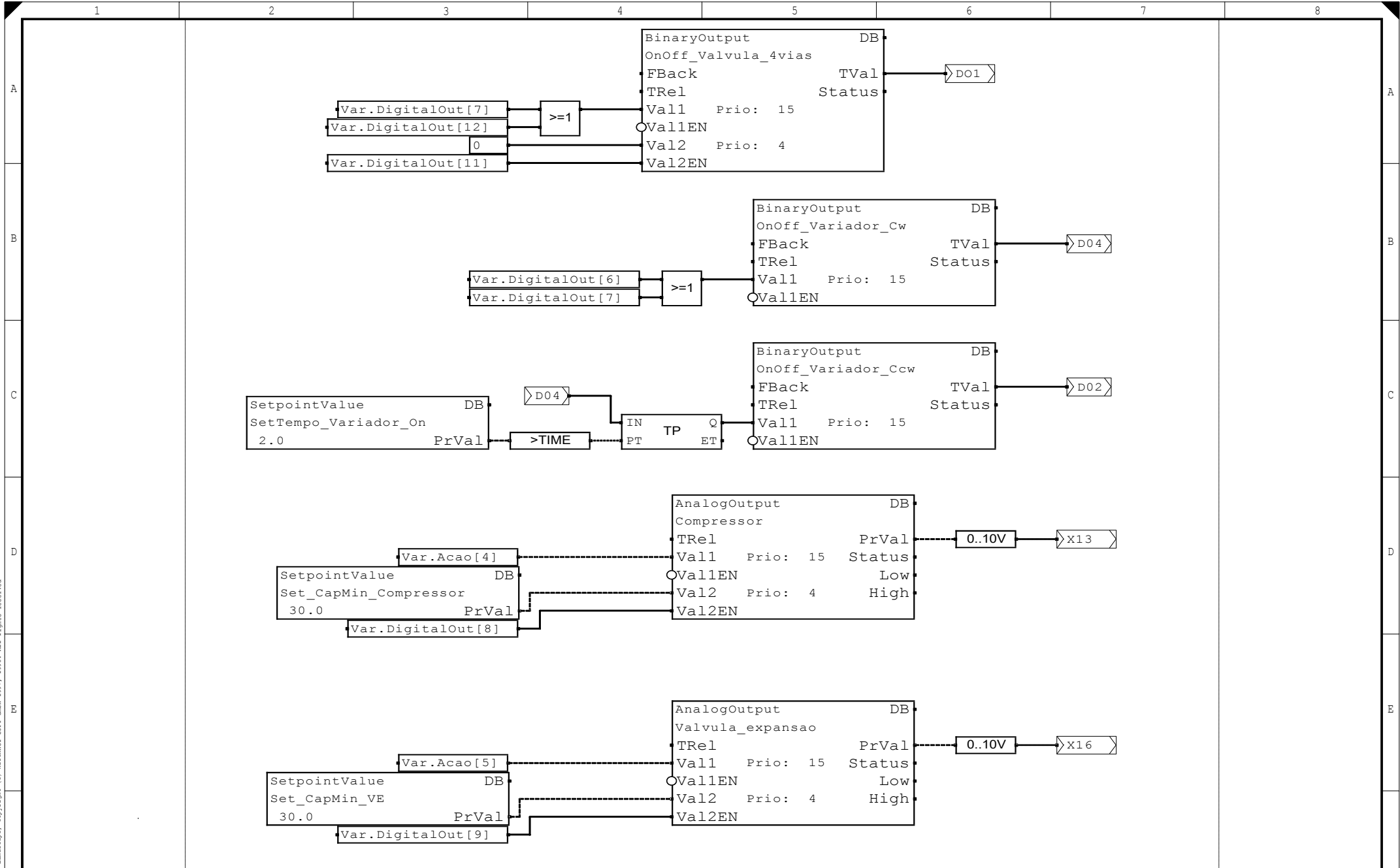
Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved.

3	040817	João*	Date	09-11-2016								Version	Rev
2	090817	João*	Desig	Super								Coordinates	A/0
1	290917	João*	Test									Sheet	2
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by					0002	of 5 Sh



Standard Form A1 Landscape, Copyright (C) Kirchner SPT GmbH 1997, 1998. All rights reserved

3	290517	João*	Date	09-11-2016									Version	Rev
2	050617	João*	Desig	Super									Coordinates	B/0
1	190717	João*	Test											Sheet 3
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by						0003	of 5 Sh

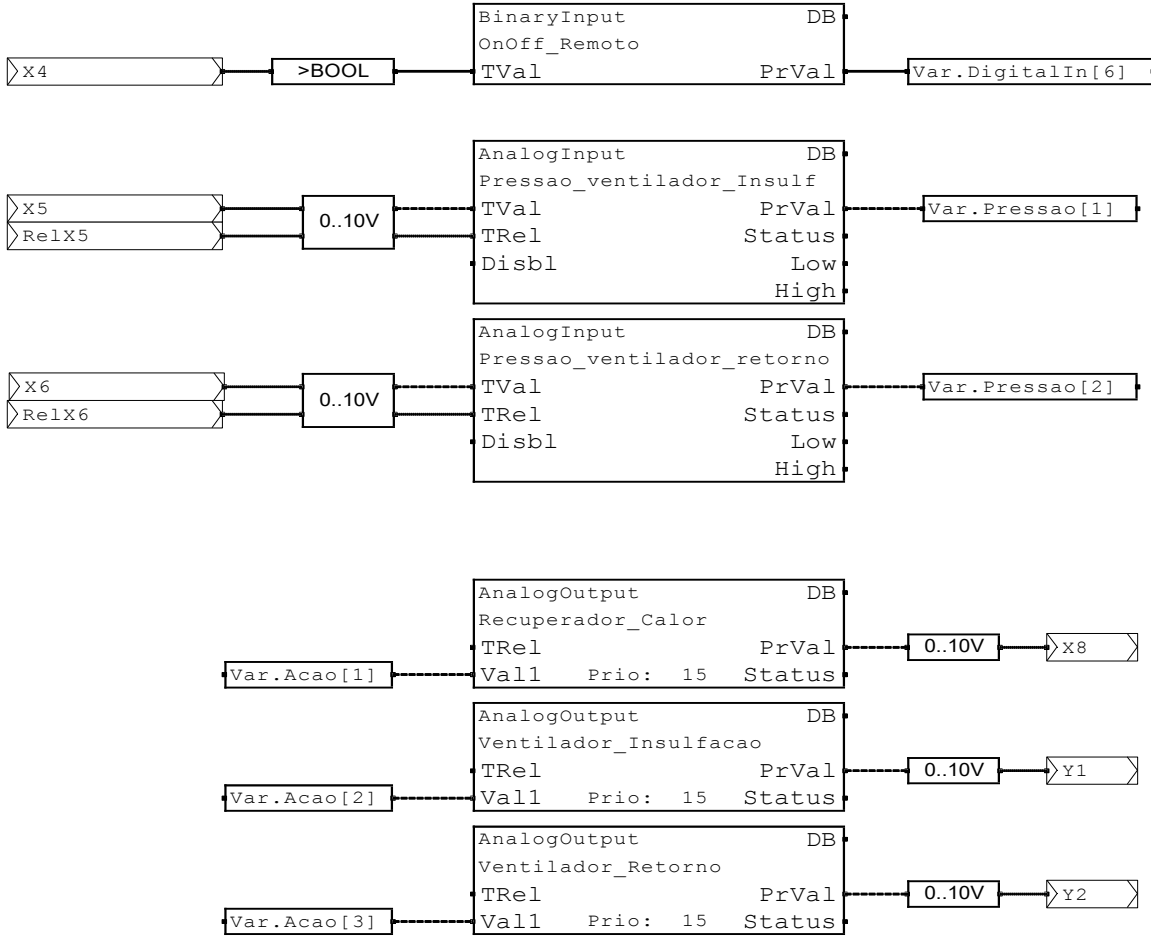


Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved.

3	190717	João*	Date	15-03-2017
2	270717	João*	Desig	João Tiago
1	130917	João*	Test	
State	Change	Date	Name	Norm
			Origin	Repl for
				Repl by

Drawing	Version	Rev
	AO_IO	Coordinates (A)/1
	0004	Sheet 4
		of 5 Sh

Standard Form A1 Landscape, Copyright (C) Kirchner SFT GmbH 1997, 1998. All rights reserved



3	040817	João*	Date	09-11-2016							Version	Rev
2	090817	João*	Desig	Super							Coordinates	A/1
1	130917	João*	Test									Sheet 5
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by				0005	of 5 Sh

1 2 3 4 5 6 7 8

A

B

C

D

E

F

A

B

C

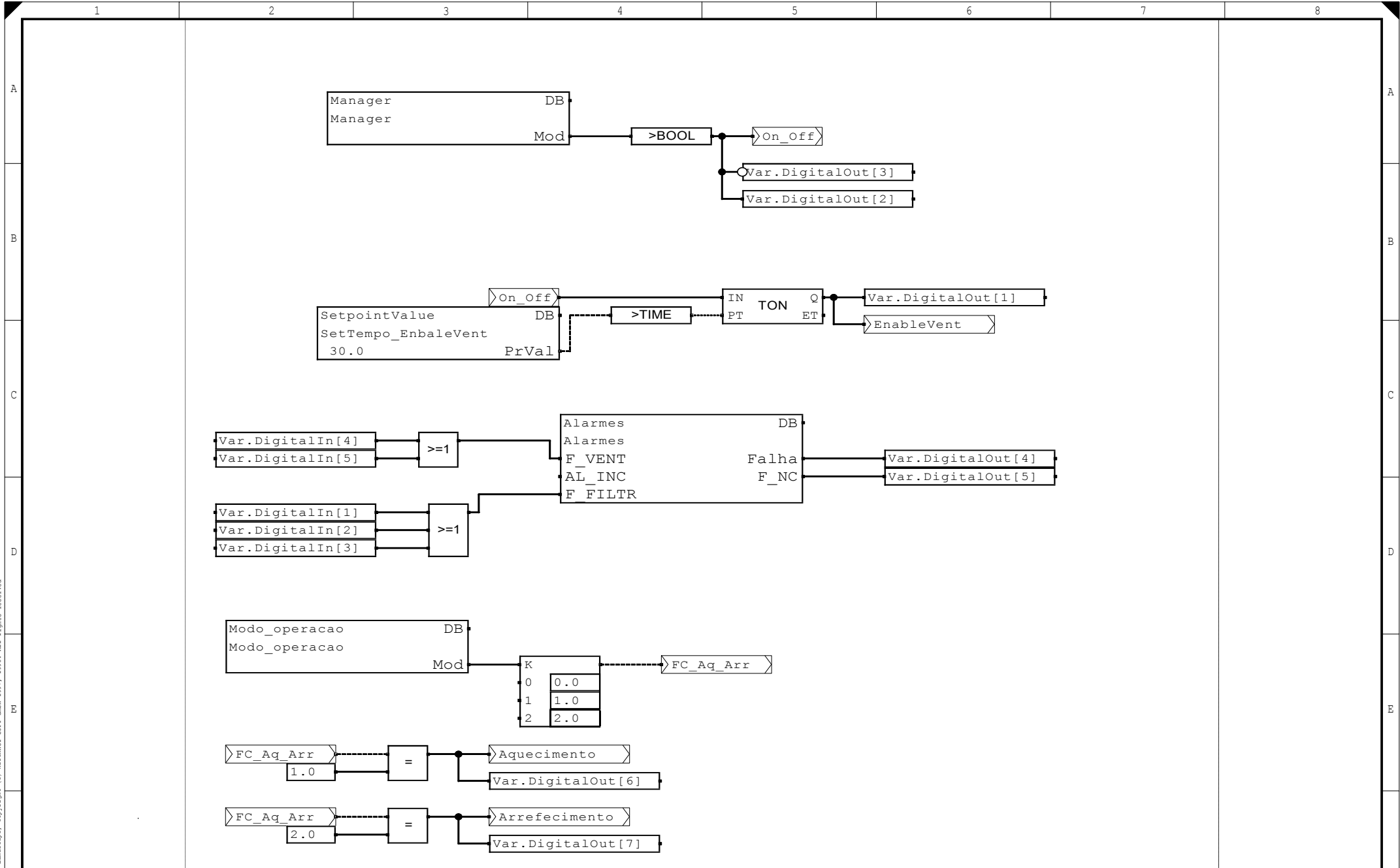
D

E

F

# Anexo F

(Programação Desenvolvida – bloco “AO\_Logica”)



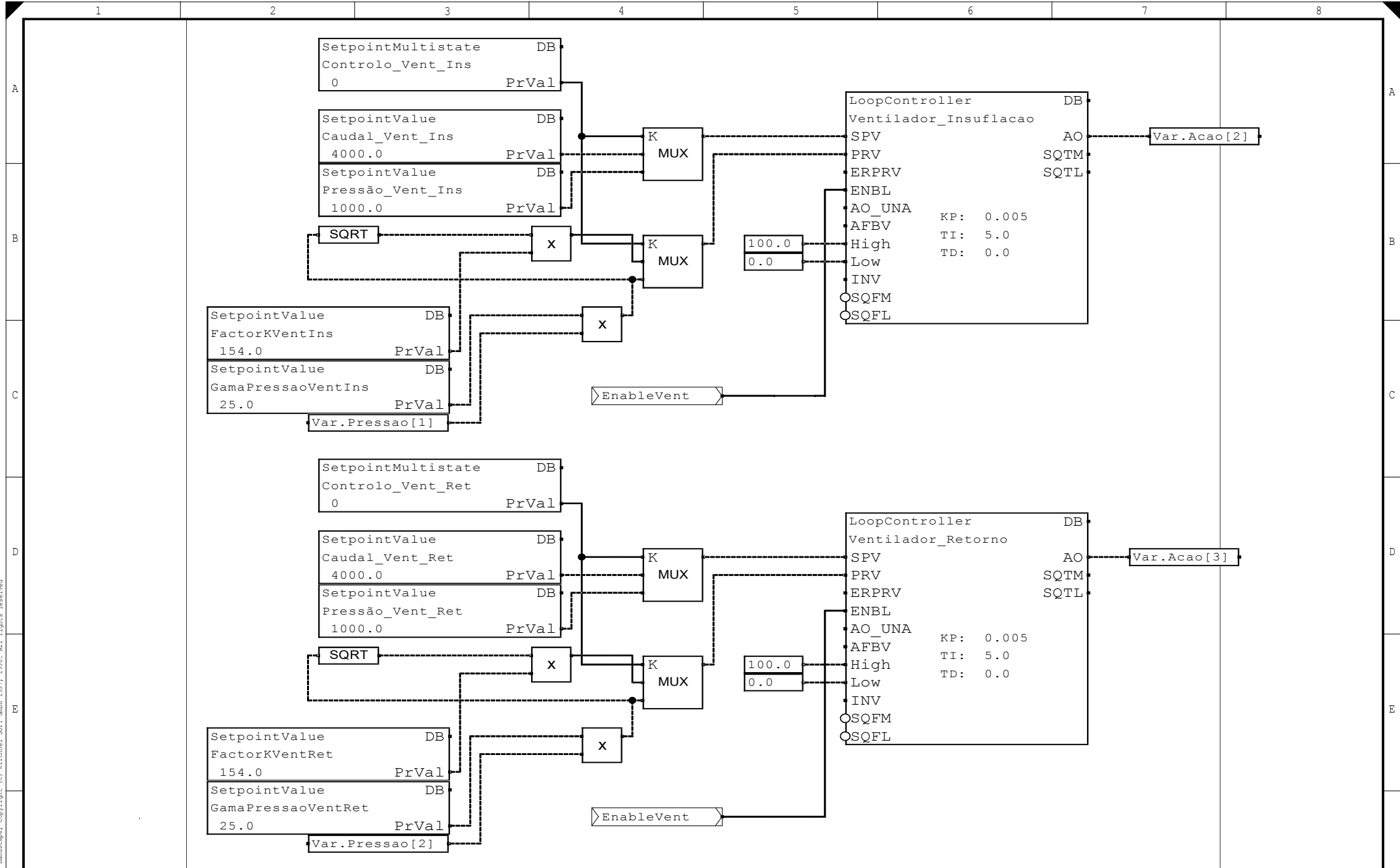
Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SFT GmbH 1997, 1998. All rights reserved.

3	110917	João*	Date	14-11-2016
2	120917	João*	Desig	Super
1	290917	João*	Test	
State	Change	Date	Name	Norm
			Origin	

Repl for	Repl by
----------	---------

Drawing
---------

AO_Logica	Version	Rev
	Coordinates	A/-1
0001	Sheet	1
	of	6 Sh

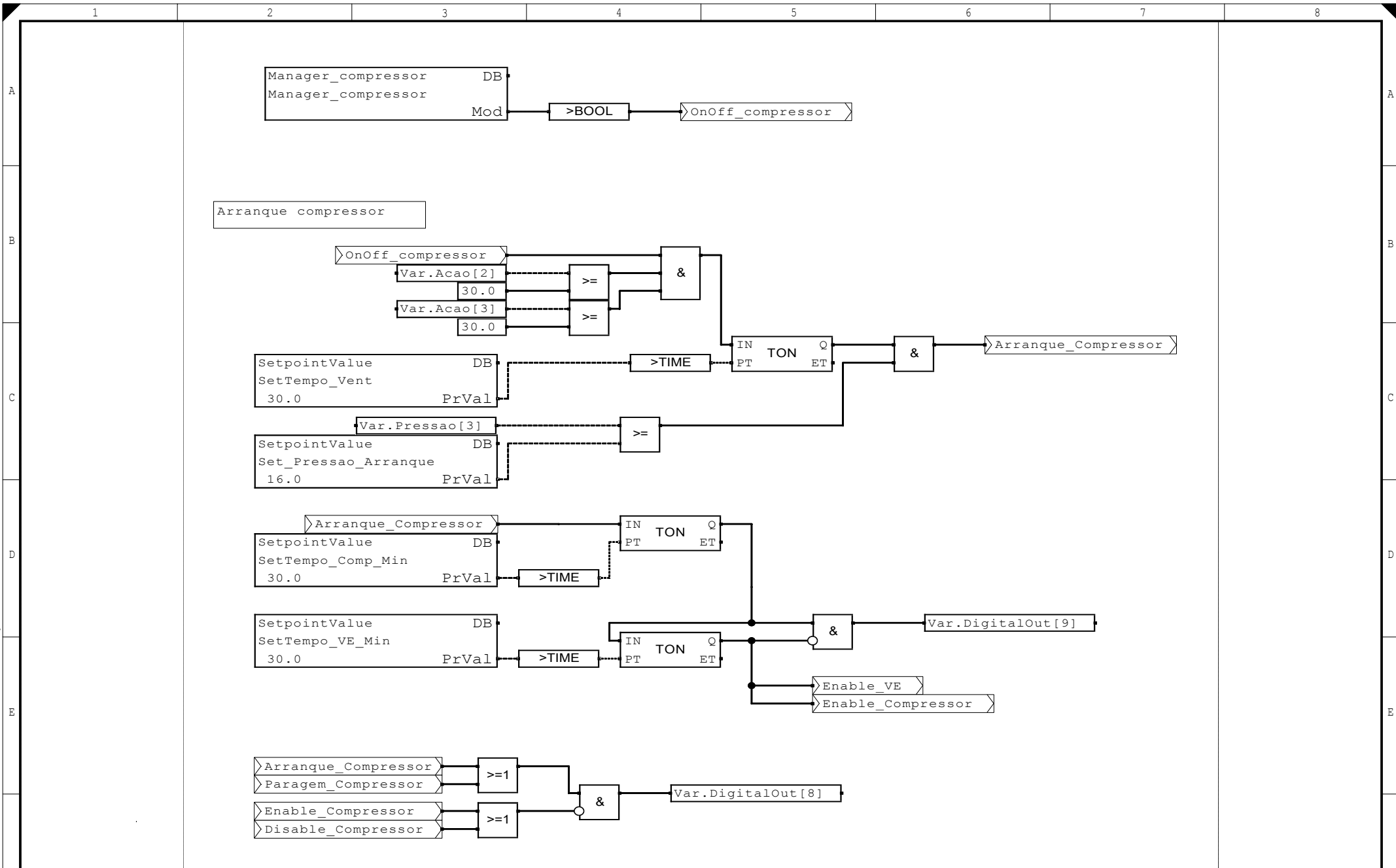


Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved.

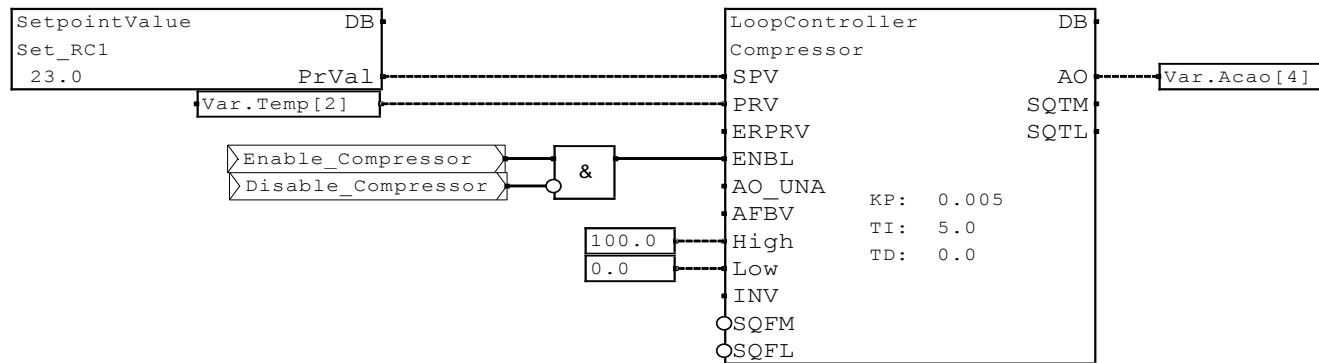
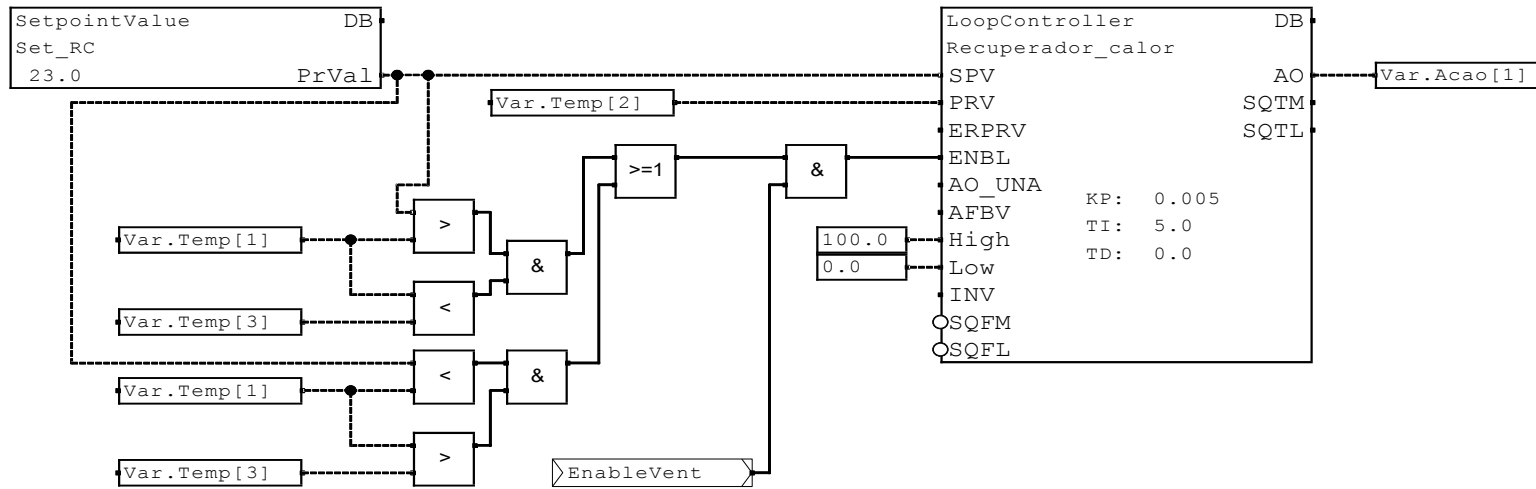
3	110917	João*	Date	15-03-2017			
2	120917	João*	Desig	João Tiago			
1	130917	João*	Test				
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by

Drawing	AO_Logica	Version	Rev
	0002	Coordinates	B/-1
		Sheet	2
		of	6 Sh

Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SPT GmbH 1997, 1998. All rights reserved.



3	010917	João*	Date	09-11-2016				Drawing		AO_Logica	Version	Rev
2	110917	João*	Desig	Super						Coordinates	A/0	
1	130917	João*	Test								Sheet	3
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by			0003	of	6 Sh
1	2	3	4	5	6	7	8					



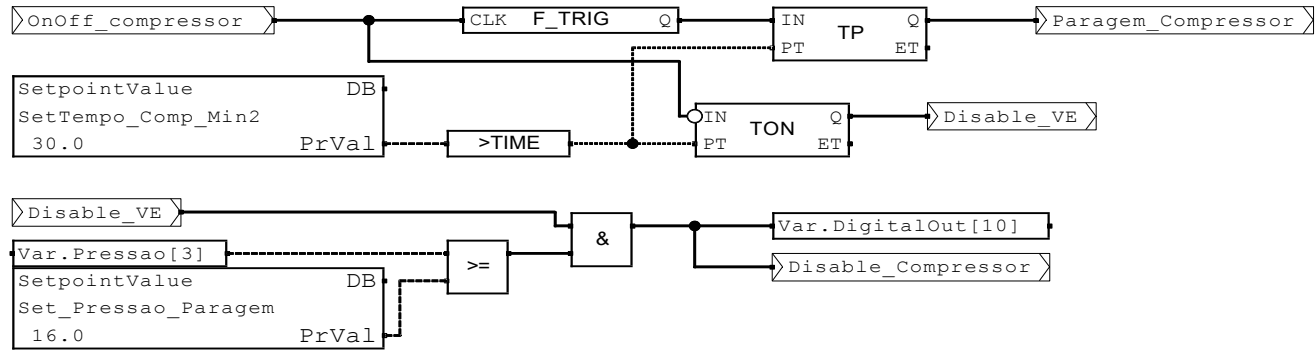
Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved

3	040817	João*	Date	15-03-2017			
2	120917	João*	Desig	João Tiago			
1	130917	João*	Test				
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by

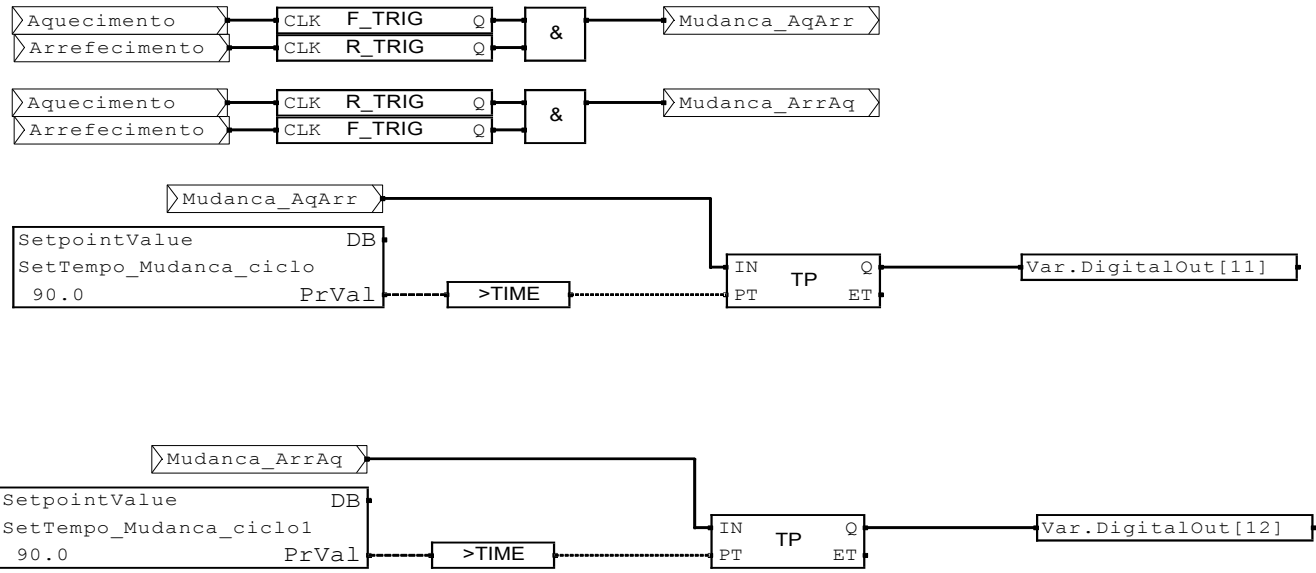
Drawing

AO_Logica		Version	Rev
		Coordinates	B/0
0004		Sheet	4
		of	6 Sh

Paragem compressor



Mudança de ciclo

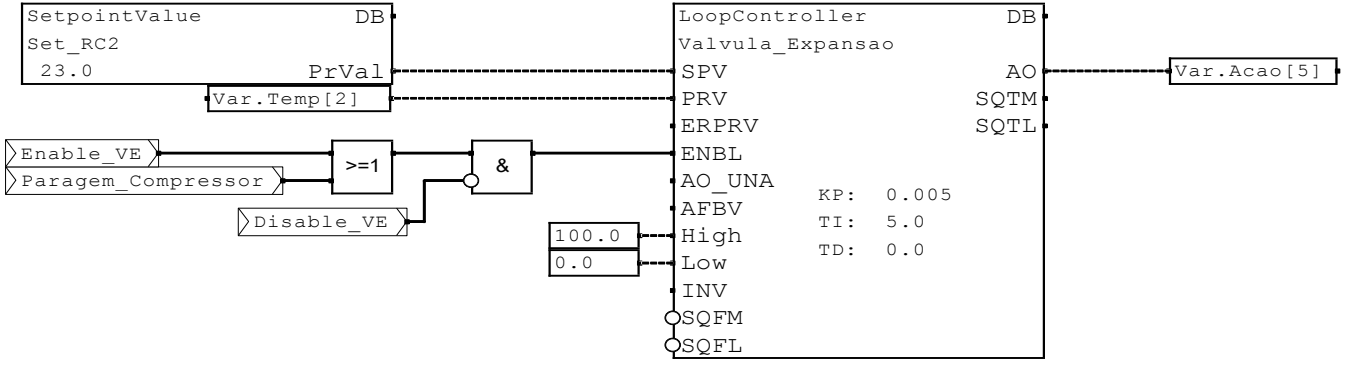


Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved

3	240717	João*	Date	15-03-2017			
2	040817	João*	Desig	João Tiago			
1	110917	João*	Test				
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by

Drawing	AO_Logica
0005	

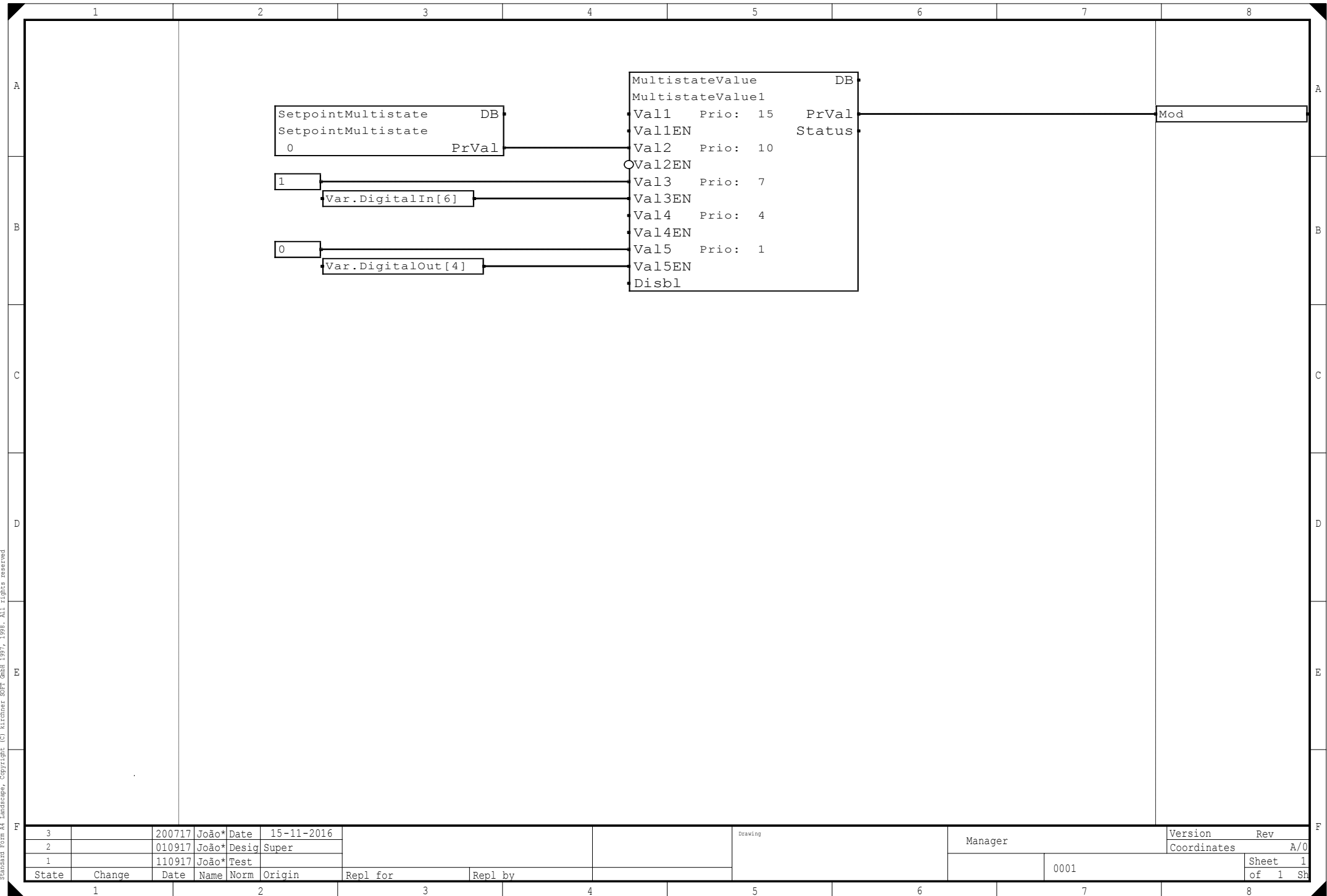
Version	Rev
Coordinates	A/1
Sheet	5
of	6 Sh



3	200717	João*	Date	15-03-2017								Version	Rev
2	240717	João*	Desig	João Tiago								Coordinates	B/1
1	130917	João*	Test									Sheet	6
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by					0006	of 6 Sh

# Anexo G

(Programação Desenvolvida – bloco “Manager”)



# Anexo H

(Programação Desenvolvida – bloco “Modo\_operacao”)

SetpointMultistate DB  
 Set\_FC\_Aq\_Arr  
 0 PrVal

0

MultistateValue DB  
 MultistateValue2  
 Val1 Prio: 15 PrVal  
 Val1EN Status  
 Val2 Prio: 4  
 Val2EN  
 Val3 Prio: 1  
 Val3EN

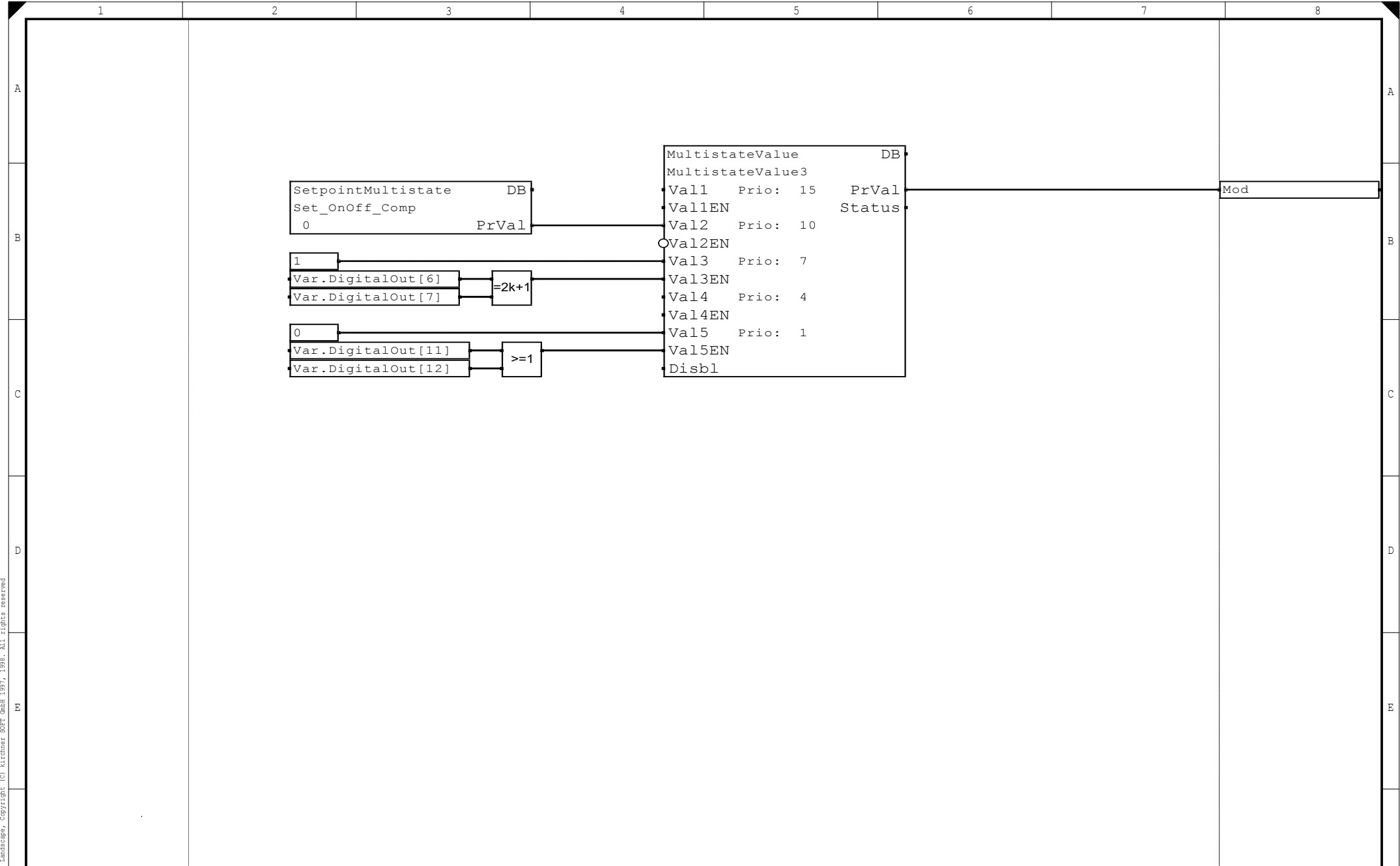
Mod

Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner S&P GmbH 1997, 1998. All rights reserved

3	200717	João*	Date	01-06-2017			Drawing		Modo_operacao	Version	Rev
2	010917	João*	Desig	João Tiago					Coordinates		A/0
1	280917	João*	Test								Sheet 1
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by		0001		of 1 Sh

# Anexo I

(Programação Desenvolvida – bloco “Manager\_compressor”)



Standard Form A4 Landscape, Copyright (C) Kirchner SGT GmbH 1997, 1998. All rights reserved

3	190717	João*	Date	01-03-2017							Version	Rev
2	200717	João*	Desig	João Tiago						Manager_compressor	Coordinates	A/0
1	110917	João*	Test								Sheet	1
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by			0001	of	1 Sh

1 2 3 4 5 6 7 8

A

B

C

D

E

F

A

B

C

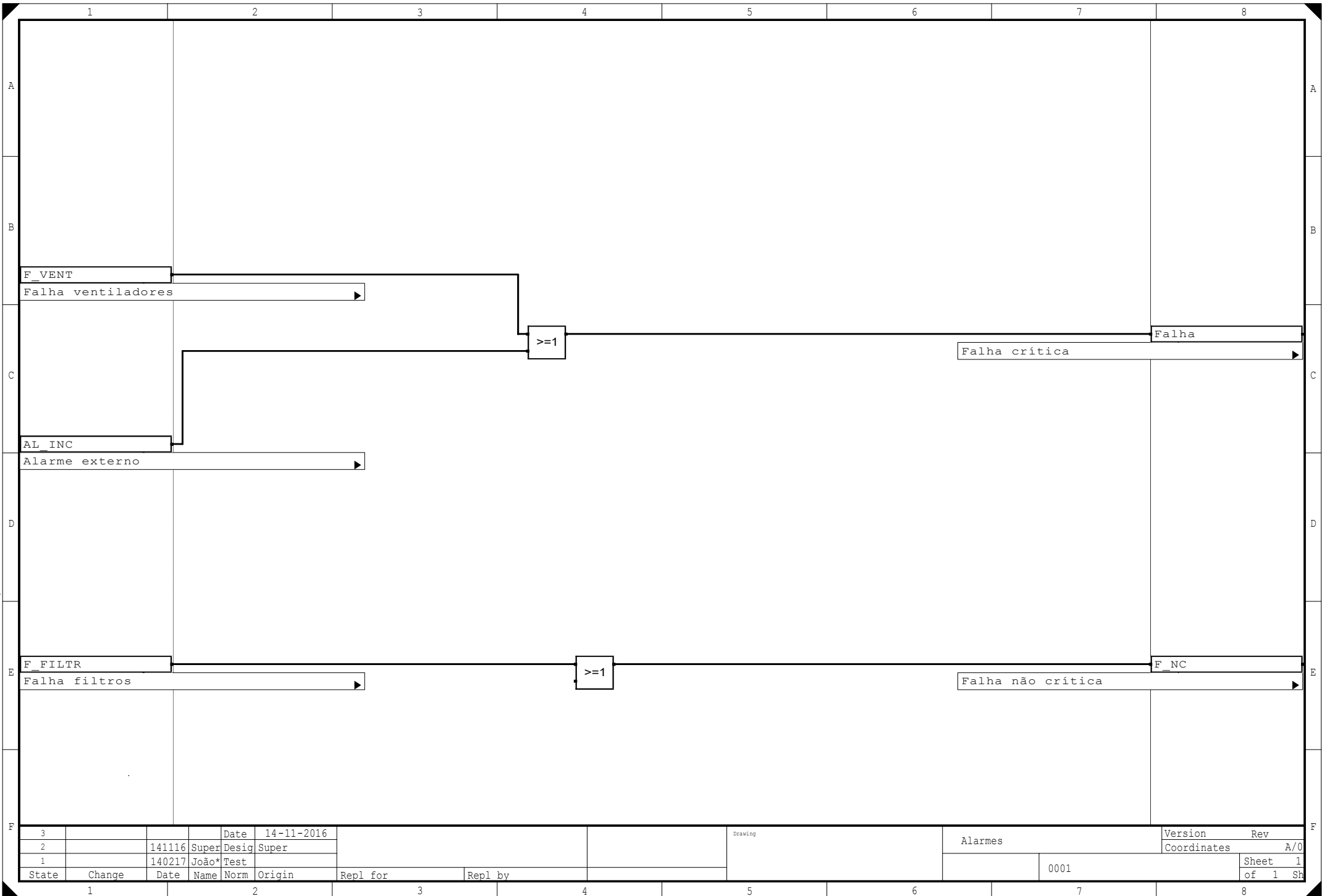
D

E

F

# Anexo J

(Programação Desenvolvida – bloco “Alarmes”)



3				Date	14-11-2016								Version	Rev	
2		141116	Super	Desig	Super								Alarmes	Coordinates	A/0
1		140217	João*	Test											Sheet 1
State	Change	Date	Name	Norm	Origin	Repl for	Repl by						0001		of 1 Sh