

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Projeto de um sistema de aquisição de dados para a manutenção preditiva de uma unidade embarcada de produção de ar comprimido

Pedro Manuel da Silva Oliveira Pinto



Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Fernando Gomes de Almeida

Coorientador na Metro do Porto S.A: Engenheiro Pedro Mota Pereira

18 de Setembro de 2019

**Projeto de um sistema de aquisição de dados para a
manutenção preditiva de uma unidade embarcada de
produção de ar comprimido**

Pedro Manuel da Silva Oliveira Pinto

Dissertação de Mestrado

Resumo

A manutenção preditiva visa prever avarias num sistema através da monitorização da atividade deste, de modo a que se possa fazer a manutenção dos equipamentos em falha antes que estes avariem, aumentando a fiabilidade, disponibilidade e segurança dos sistemas, ao mesmo tempo que diminui os seus custos de manutenção. Assim, a Metro do Porto pretende implementar um sistema de manutenção preditiva na unidade de produção de ar comprimido dos seus veículos Eurotram a fim de impedir a ocorrência de avarias nestes durante a operação comercial.

Como tal, de modo a atingir os objetivos propostos para esta dissertação, começou-se por fazer um estudo da unidade de produção de ar comprimido do Eurotram e dos seus modos de funcionamento. Posteriormente foi analisado o historial de relatórios de falhas relativos a este sistema de modo a identificar todos os modos de falha passíveis de ocorrer, a sua periodicidade, os modos de deteção e as consequências de cada um e foi estabelecida uma relação de causa-efeito para cada uma delas. Deste modo foi possível identificar as grandezas a monitorizar para detetar cada um dos modos de falha analisados e que tipo de sensores e transdutores seriam usados para medir cada uma.

Finalmente, foi feita uma análise de mercado quanto a fornecedores de sensores, transdutores e sistemas de aquisição de dados capazes de operar em ambiente ferroviário de modo a adquirir e montar em dois veículos todos os equipamentos necessários à recolha e envio dos dados que mostram a condição da unidade de produção de ar comprimido em tempo real para um servidor, através do qual será controlada a atividade do veículo. Por fim, foram definidos os protocolos de comunicação e envio de dados em tempo real para o servidor localizado no INESC TEC.

Abstract

Predictive maintenance aims to predict system malfunctions by monitoring system activity so that faulty equipment can be replaced before they fail, increasing the reliability, availability, and safety of systems while decreasing system failures and maintenance costs. Therefore, Metro do Porto intends to implement a predictive maintenance system in the compressed air production unit of its Eurotram vehicles in order to prevent malfunctions during its commercial operation.

Thus, in order to achieve the objectives proposed for this dissertation, there was made a study on Eurotram's compressed air production unit and its modes of operation. Subsequently, the history of failure reports for this system was analyzed in order to identify all possible failure modes, their periodicity, the modes of detection and the consequences of each, and a cause-effect relationship was established for each one of them. After that, it was possible to identify the variables to be monitored to detect each of the failure modes analyzed and what type of sensors and transducers would be used to measure each one.

Finally, a market analysis was made for suppliers of sensors, transducers and data acquisition systems capable of operating in a railway environment in order to acquire and assemble in two vehicles all the equipment necessary for the collection and data sending, showing the real-time condition of the compressed air production unit to a server, through which the vehicle activity will be controlled. Finally, the protocols for communication and real time data sending to the server located at INESC TEC were defined.

Agradecimentos

Ao Engenheiro Pedro Mota Pereira pela orientação, disponibilidade, aconselhamento e por ter possibilitado a realização da minha tese na Metro do Porto S.A.. Aos Engenheiros Luís Nunes e José Rêgo pelo apoio, motivação e bom ambiente criado no escritório. À restante equipa da Metro do Porto pela ajuda prestada, simpatia e por ter facilitado a minha adaptação ao ambiente da empresa. Aos trabalhadores da EMEF de Guifões pela disponibilidade e ajuda prestada.

Ao Professor Fernando Gomes de Almeida pelo acompanhamento, rigor e pelos conhecimentos científicos cruciais à realização da dissertação.

Aos meus amigos e familiares por toda a ajuda, motivação e alegria que me deram ao longo da dissertação, mas principalmente ao longo destes 23 anos de existência.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto *FailStopper* (DSAIPA / DS /0086/2018), financiado pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia). Agradeço ao INESC TEC pela atribuição da bolsa de investigação (7537/ B1_B1D/ 2019) pelo projecto *FailStopper*. Aos investigadores João Gama e Rita Ribeiro pelo envolvimento e apoio prestado no projeto.

*A vida é uma aula prática,
Não peças que assinem por ti.*

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Projeto <i>FailStopper</i> na Metro do Porto S.A.	2
1.3	Objetivos do projeto	2
1.4	Método seguido no projeto	2
1.5	Estrutura da dissertação	3
2	Sistema de ar comprimido do Eurotram	5
2.1	Eurotram	5
2.2	Sistema de ar comprimido	6
2.2.1	Percurso do ar	7
2.2.2	Motor elétrico	8
2.2.3	Compressor	8
2.2.4	Filtro separador ciclónico	13
2.2.5	Torres secadoras de ar	14
2.2.6	Válvulas direcionais	19
2.2.7	Pressostato de comando	20
2.2.8	Eletroválvula de comando de drenagem (A4)	20
2.2.9	Válvula de segurança	20
2.2.10	Pressostato de pressão mínima (pressostato de alarme)	20
2.2.11	Reservatórios de ar comprimido	21
3	Manutenção e métodos de análise de falhas	23
3.1	Manutenção	23
3.1.1	Manutenção corretiva	24
3.1.2	Manutenção preventiva	25
3.1.3	Manutenção preditiva	27
3.2	Métodos de análise de falhas	27
3.2.1	FMEA (<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>)	27
3.2.2	FMECA (<i>Failure Mode, Effects & Criticality Analysis</i>)	28
3.3	<i>Reliability Centred Maintenance</i> (RCM)	33
3.3.1	Passos para a implementação do RCM	34
3.3.2	Funções e performance requerida	34
3.3.3	Falhas funcionais	36
3.3.4	Modos de falha	37
3.3.5	Consequências das falhas	38
3.3.6	Ações preventivas	40
3.3.7	Ações preditivas	42

3.3.8	Importância do <i>Data Mining</i> no RCM	45
4	Principais falhas da APU e métodos de detecção das mesma	47
4.1	Eletroválvula de comando de drenagem A4	47
4.1.1	Modos de falha - Sub-dimensionamento	48
4.1.2	Modos de falha - Entupimento dos canais da válvula	48
4.1.3	Modos de falha - Falha elétrica	49
4.1.4	Solução apresentada para detetar as falhas da eletroválvula A4	49
4.2	Válvula de descarga do filtro separador ciclónico (A5)	50
4.3	Fugas de óleo	51
4.4	Fugas no sistema de ar comprimido a jusante da APU	52
4.5	Avárias relativas ao motor	52
4.6	Avárias relativas aos pressostatos	52
4.7	Avárias nas torres de secagem	53
5	Sensorização	55
5.1	Sistema de aquisição de dados e implicações que este terá na sensorização	56
5.2	Requisitos dos equipamentos a montar na APU	57
5.3	Escolha dos detetores e transdutores	60
5.3.1	1º - Transdutor de corrente	62
5.3.2	2º - Termopar tipo K + Conversor do sinal	64
5.3.3	3º - Transdutor de pressão que monitoriza a eletroválvula A4	66
5.3.4	4º - Transdutor de pressão que monitoriza a pressão no compressor	68
5.3.5	5º - Transdutor de pressão que monitoriza a pressão no painel pneumático	69
5.3.6	6º - Transdutor de pressão que monitoriza a descarga das torres secadoras de ar	70
5.3.7	7º - Transdutor de pressão que monitoriza a pressão à saída dos reservatórios	71
5.3.8	8º e 16º - Caudalímetro	72
5.3.9	Sinais a ler a partir da carta eletrónica (9º ao 13º)	75
5.3.10	14º - Sensor capacitivo	77
5.3.11	15º - Pressostato de detecção da descarga do filtro separador ciclónico	79
5.4	Montagem e orçamentos	81
5.4.1	Orçamentos	81
6	Sistema de Aquisição de Dados e Protocolos de Comunicação	83
6.1	MB1000	84
6.2	Protocolos de Comunicação	87
6.2.1	Protocolo FTP	87
6.3	Tratamento dos dados	90
6.3.1	Sinais dos transdutores	91
6.3.2	Contexto de operação	94
7	Conclusões	99
7.1	Satisfação dos objetivos	101
7.2	Trabalhos futuros	101
	Referências	103
A	Tabela FMECA da APU	105

B	Esquema elétrico a montar na APU	131
C	Fichas técnicas dos equipamentos adquiridos	133

Lista de Figuras

2.1	Veículo Eurotram da Metro do Porto (Bombardier, 2007).	5
2.2	Distribuição dos módulos do veículo. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	6
2.3	Esquema do sistema de ar comprimido. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	7
2.4	Funcionamento do compressor esquematizado (Metro do Porto S.A., 2002b).	8
2.5	Funcionamento do compressor no modo em carga.	9
2.6	Funcionamento do compressor em vazio	10
2.7	Percurso do óleo no compressor.	12
2.8	Filtro separador ciclónico. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	13
2.9	Esquema da secagem do ar na câmara I. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	15
2.10	Regeneração do granulado desumificador na câmara II. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	16
2.11	Regeneração da torre secadora de ar (câmara I). Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	17
2.12	Drenagem automática. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	18
2.13	Válvulas presentes na APU. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	19
3.1	Evolução da manutenção (Moubray, 1997).	23
3.2	Curva da taxa de falhas segundo a primeira geração da manutenção (Oliveira, 2015).	24
3.3	Curva da taxa de falhas de um gráfico em banheira (de Oliveira Viana et al., 2017).	25
3.4	Vários tipos de distribuições dos ciclos de vida de componentes (Oliveira, 2015).	26
3.5	Margem de degradação (Moubray, 1997).	35
3.6	Intervalo da manutenção (Moubray, 1997).	35
3.7	Desempenho nas falhas funcionais (Moubray, 1997).	36
3.8	Curva P-F (Moubray, 1997).	42
3.9	Intervalos P-F inconsistentes (Moubray, 1997).	42
3.10	Inspeções periódicas para detetar pontos P (Mutual Consultants, 2010).	43
3.11	Descoberta de diferentes pontos P com a monitorização de diferentes variáveis (Moubray, 1997).	44
4.1	Válvula A4 ativada e desativada. Adaptado de NORGREN - Fluid Controls (n.d.).	48
4.2	Fotografia da válvula A4	49
4.3	Sensores de monitorização da válvula A4. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	50
5.1	Distribuição dos transdutores e detetores a montar na APU que constavam no plano inicial de manutenção preditiva. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).	55
5.2	Transdutor de corrente AT 20 B420L (LEM, n.d.).	63
5.3	Local da caixa da carta eletrónica onde se encontram os 3 cabos correspondentes às 3 fases do motor trifásico.	63
5.4	Bujão de drenagem do óleo.	65

5.5	Termopar <i>TC12-M</i> do tipo K (WIKA, 2019) (à esquerda) + Conversor do sinal (OSAKA, n.d.) (à direita).	66
5.6	Transdutor de pressão <i>PT5414</i> (IFM, 2015).	67
5.7	Conduta a alterar para colocar o transdutor de pressão.	68
5.8	Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a pressão do compressor.	69
5.9	Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a pressão do painel pneumático.	70
5.10	Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a descarga das torres secadoras de ar.	71
5.11	Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a pressão do painel pneumático.	72
5.12	Caudalímetro <i>SD6500</i> (IFM, 2018).	73
5.13	Local da montagem do caudalímetro.	75
5.14	Sinais a ler a partir da carta eletrónica.	76
5.15	Visor do nível do óleo.	77
5.16	Detetor capacitivo <i>KQ6001</i> (IFM, 2013).	79
5.17	Pressostato <i>PSM01</i> (WIKA, 2017).	80
5.18	Local da montagem do pressostato <i>PSM01</i>	80
6.1	<i>MB1000 Box</i> da <i>Nomad Tech</i> (Nomad Tech, n.d.b).	83
6.2	Dimensões da caixa do <i>MB1000</i> da <i>Nomad Tech</i> (Nomad Tech, n.d.a).	85
6.3	Esquema dos processos que correm no <i>MB1000</i> e no servidor de modo a ocorrer o envio de dados.	88
6.4	Representação das trocas de dados entre <i>MB1000</i> , servidor e computador pessoal.	89
6.5	Corrente de saída do transdutor de corrente em função da corrente que passa no motor trifásico.	91
6.6	Corrente de saída do conversor em função da temperatura do óleo.	92
6.7	Corrente de saída do transdutor de pressão em função da pressão exercida sobre este.	92
6.8	Corrente de saída do caudalímetro em função do caudal volúmico que passa por este.	93
6.9	Locais onde serão lidas as condições atmosféricas através do Dark Sky (2019).	96
6.10	Distribuição das zonas às quais serão atribuídas as condições atmosféricas de cada localidade. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2019).	97
B.1	Esquema elétrico a montar na APU.	132

Lista de Tabelas

3.1	Grau de severidade da falha (S). Adaptado de Siqueira Campos (2019).	30
3.2	Grau de ocorrência da falha (O). Adaptado de Siqueira Campos (2019).	31
3.3	Grau de detecção da falha (D). Adaptado de Siqueira Campos (2019).	32
5.1	Especificação dos transdutores.	59
5.2	Especificação dos detetores.	59
5.3	Instrumentos de medição comprados.	81
A.1	Tabela FMECA da APU.	129

Abreviaturas

APU	Air Production Unit
DV	Drain Valve
ET	Eurotram
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects & Criticality Analysis
ICM	Inter-communication Module
LPS	Low Pressure Switch
MPG	Mechanical Pressure Switch
PCC	Posto Central de Comando
PMO	Project Management Office
RCA	Root Cause Analysis
RCM	Reliability Centered Maintenance
RPN	Risk Priority Number

Capítulo 1

Introdução

Os veículos Eurotram da Metro do Porto S.A. usam ar comprimido no acoplamento entre veículos (sistema de engate automático), na lubrificação dos verdugos, na alimentação do sistema de areeiros e na suspensão secundária, a qual nivela o veículo, sendo este último vital, o que faz com que uma avaria pneumática leve à remoção imediata do veículo para reparação.

O sistema de produção do ar comprimido dos veículos é dos sistemas que mais avarias apresenta, havendo cerca de 100 avarias diretamente ligadas à produção do ar comprimido por ano, o que constitui cerca de 10 % das avarias totais anuais de toda a frota. Visto que a ocorrência destas avarias leva à perda de várias viagens, surgiu o projeto *FailStopper* com o intuito de prever as avarias a tempo de serem evitadas ou para que as suas consequências possam ser atenuadas. O projeto surge de uma parceria entre a Metro do Porto S.A. e o INESC TEC (*Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science*) e visa a previsão de avarias nesta unidade para impedir que ocorram durante a operação comercial.

O *FailStopper* foi um dos 15 projetos aprovados no Concurso de Projetos de Investigação Científica e Desenvolvimento Tecnológico em Ciência dos Dados e Inteligência Artificial na Administração Pública, financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), e tem um orçamento de aproximadamente 95.146,60 €. Esta iniciativa da FCT tem também o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior e o Ministério da Modernização Administrativa.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O projeto *FailStopper* visa a deteção antecipada de avarias no sistema de produção do ar comprimido a fim de impedir que estas ocorram durante a operação comercial, evitando a perda de viagens devido a avarias e aumentando a fiabilidade do material circulante. Além disso, este projeto permitirá a implementação de um método de manutenção preditiva nos veículos, o que irá reduzir os custos de manutenção.

A dissertação "Projeto de um sistema de aquisição de dados para a manutenção preditiva de uma unidade embarcada de produção de ar comprimido" faz parte do projeto supracitado e tem como objetivo a definição de um sistema de aquisição de dados para a manutenção preditiva da

unidade referida presente nos veículos Eurotram. Assim, pretende-se investigar os modos de funcionamento desta unidade presente nos Eurotram a fim de escolher as variáveis a ler e monitorizar a evolução dos valores destas durante a operação, para definir uma panóplia de detetores e transdutores a adquirir e definir em que pontos do veículo estes deverão ser colocados para receber informação do funcionamento deste em tempo real. Tenciona-se fazer a especificação de um sistema de aquisição de dados e implementar um protocolo de comunicações capaz de enviar esta informação para um servidor que será colocado nas instalações do INESC TEC.

1.2 Projeto *FailStopper* na Metro do Porto S.A.

O projeto tem a duração de 2 anos e surge a partir de uma parceria entre a Metro do Porto S.A. e o INESC TEC. Caso o projeto seja bem sucedido, a Metro do Porto poderá impedir a ocorrência de avarias pneumáticas durante a sua operação comercial e implementar um método de manutenção com base na condição dos veículos, o qual poderá ser alargado a toda a frota. Além disso, poderá ser feita uma transferência de conhecimento para outras empresas com problemas similares, como é o caso da Comboios de Portugal (CP), cujos veículos também apresentam problemas análogos.

1.3 Objetivos do projeto

Esta dissertação insere-se na fase inicial do *FailStopper*, a qual tem a duração de 6 meses e visa o estudo da unidade de produção do ar comprimido, a definição das grandezas a monitorizar, dos detetores e transdutores que irão ler estas grandezas no veículo, do sistema de aquisição de dados e dos módulos de comunicação usados para enviar esta informação através da *cloud* para os escritórios do INESC TEC.

Posteriormente, durante 18 meses será feito um tratamento destes dados de modo a detetar os padrões de funcionamento do veículo e indicar a presença de falhas antes destas gerarem avarias. Visto o *FailStopper* tratar-se de um projeto piloto, no final desta primeira fase serão instrumentados 2 veículos com vários sensores. No entanto, prevê-se que alguns destes possam ser redundantes e que futuramente não venham a ser colocados nos veículos caso se venha a instrumentar toda a frota de 72 *Eurotrams* da Metro do Porto.

1.4 Método seguido no projeto

Inicialmente foi feita uma pequena abordagem das principais unidades do veículo Eurotram e da estrutura deste. Fez-se um estudo pormenorizado do sistema de produção de ar comprimido do veículo e dos seus modos de funcionamento.

Posteriormente, recorrendo aos métodos de análise RCM (*Reliability Centered Maintenance*), FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) fez-se uma análise das falhas do sistema em questão de modo a identificar as fragilidades

deste. Através desta análise fez-se uma tabela FMECA na qual constam todas as falhas passíveis de ocorrer e a sua criticidade tendo em conta os componentes e o contexto de operação do veículo.

Sabidas as falhas mais comuns e as causas a que estão associadas, identificaram-se as variáveis a monitorizar, estimou-se entre que valores é que estas se inserem durante a operação e definiram-se os pontos fulcrais onde estas grandezas deveriam ser medidas. Foi com base nesta informação e com a oferta do mercado que se escolheram os detetores e transdutores a adquirir para implementar no sistema.

Por último, definiu-se um sistema de aquisição de dados e os protocolos de comunicação para enviar a informação lida em tempo real nos detetores e transdutores para um servidor a fim de monitorizar a atividade do veículo para se definir a condição do mesmo.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação inicia-se com este primeiro capítulo que serve como introdução ao protejo *FailStopper*, aos seus objetivos, motivações e condições em que foi realizado.

O segundo capítulo surge do estudo do ambiente já existente e apresenta sucintamente o problema. Nesse capítulo é feita uma breve introdução que aborda o veículo Eurotram e as suas principais características. Posteriormente é feita uma abordagem detalhada do sistema de ar comprimido que se foca nos componentes referentes à unidade de produção de ar comprimido, nos percursos feitos pelo ar e nos modos de funcionamento desta nesta unidade.

No terceiro capítulo é feito um estudo das várias abordagens que podem ser seguidas na manutenção de um sistema e é feita uma análise de alguns métodos de análise de falhas de sistemas, como é o caso dos métodos FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). Aqui também é apresentado o método de manutenção preditiva RCM (*Reliability Centered Maintenance*), o qual foi usado de modo a realizar o plano de manutenção que virá a ser implementado nos veículos a instrumentar.

Seguidamente, é feita uma apresentação da solução proposta para o problema, a qual está distribuída pelos capítulos 4, 5 e 6. No primeiro destes, são apresentadas as principais falhas referentes à unidade de produção de ar comprimido e possíveis métodos de deteção ou previsão das mesmas. É neste capítulo que também são apresentadas as grandezas a medir, os locais onde deverão ser medidas e a estratégia de manutenção preditiva a implementar. No capítulo seguinte é feita a escolha de detetores e transdutores a implementar com base nas características anteriormente definidas para estes e é também referido o modo como será feita a montagem destes no veículo. No capítulo 6, é feita uma descrição do sistema de aquisição de dados e dos respetivos protocolos de comunicação usados para enviar a informação lida no veículo para um servidor.

Por último, são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho de dissertação, assim como os próximos passos a seguir para a conclusão do projeto *FailStopper*.

Capítulo 2

Sistema de ar comprimido do Eurotram

2.1 Eurotram

O veículo que possui o sistema de ar comprimido em estudo é o Eurotram da Metro do Porto, o qual pode ser observado na figura 2.1.



Figura 2.1: Veículo Eurotram da Metro do Porto (Bombardier, 2007).

No que toca à sua constituição, o Eurotram possui 7 módulos (de A a G), cuja distribuição pode ser vista na figura 2.2:

- Duas cabinas de condução (módulos A e G) localizadas em cada um dos extremos do veículo;
- Três salões de passageiros (módulos B, D e F);
- Dois módulos de intercomunicação (módulos C e E) entre os salões de passageiros.

É de destacar que apenas as cabinas de condução e os ICM (*Inter-communication Module*) possuem *bogies*, ou seja, possuem uma estrutura metálica que faz a ligação entre o veículo e a via. Cada *bogie* dos Eurotram possui 4 rodas, sendo que dos 4 *bogies* existentes no veículo, três são motores (módulos A, E e G), enquanto que o *bogie* C é de reboque.

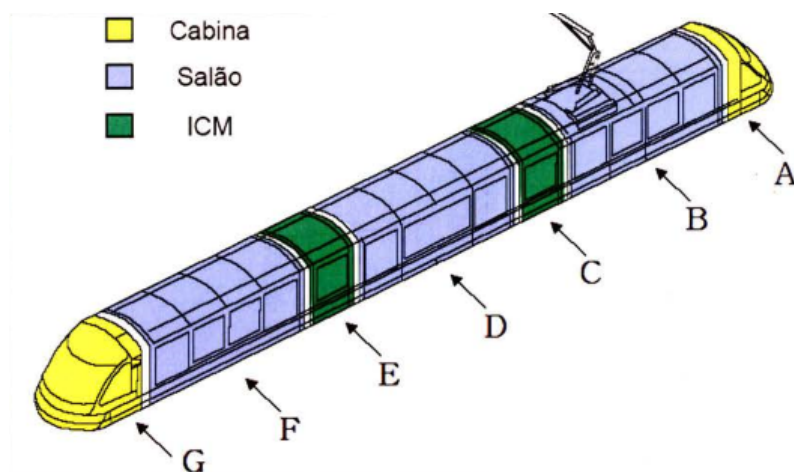


Figura 2.2: Distribuição dos módulos do veículo. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

De modo a fazer uma ligação que permitisse o movimento entre os vários módulos, este veículo apresenta pontos articulados nos limites entre módulos, pontos estes que não são visíveis do exterior devido à existência de foles nos limites entre módulos.

Os equipamentos que controlam toda a atividade do veículo encontram-se alojados no tejadilho de cada um dos módulos. Esta solução construtiva revelou-se a mais vantajosa uma vez que o Eurotram é um veículo de piso rebaixado e, como tal, não seria possível colocar estes equipamentos na parte inferior do veículo, sendo o tejadilho a parte que apresentaria mais espaço livre para colocar estes elementos funcionais.

No que toca às dimensões, os Eurotram apresentam 35 metros de comprimento, 2.65 metros de largura e 3.30 metros de altura. No entanto, pelo grande número de pontos articulados, podem fazer curvas até um raio de 18 metros (Metro do Porto S.A., 2002b). Contam com uma lotação de 80 lugares sentados e espaço para mais 215 passageiros a viajar em pé. São veículos ferroviários relativamente leves, tendo 40.5 toneladas e podendo atingir velocidades até aos 80 km/h (Metro do Porto S.A., 2002b).

2.2 Sistema de ar comprimido

O sistema de ar comprimido dos Eurotram da Metro do Porto possui uma unidade de produção de ar comprimido (APU – *Air Production Unit*) localizada no tejadilho do módulo C de cada um dos seus veículos (figura 2.2). A APU é protegida por uma cobertura que diminui o ruído proveniente do seu funcionamento e está montada sob umas molas viscoelásticas para diminuir as vibrações.

Este sistema é responsável pela produção do ar comprimido que é usado nas bolsas de ar da suspensão secundária (de modo a formar uma almofada de ar que diminui a vibração das cabinas do veículo e para o nivelar de modo a que este esteja sempre à mesma altura em relação à via), sistema de areeiros (responsável por lançar areia para os carris de modo a aumentar o atrito entre o veículo e a via), sistema do lubrificador do verdugo (ao qual se recorre para lubrificar o verdugo nas curvas, de modo a diminuir o atrito entre este e os carris) e no sistema de engate automático (responsável pelo acoplamento realizado entre dois veículos).

2.2.1 Percurso do ar

A APU pode-se dividir em 3 grandes zonas: a de compressão do ar, a de secagem do ar e a de controlo da pressão do ar, as quais podem ser observadas no esquema da figura 2.3.

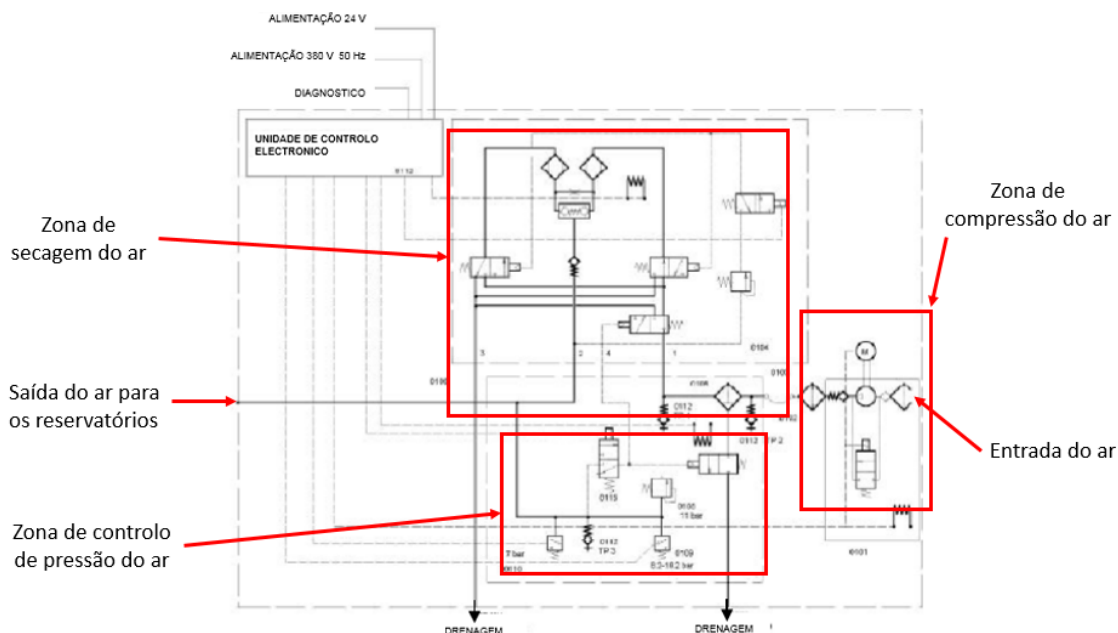


Figura 2.3: Esquema do sistema de ar comprimido. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

O percurso do ar inicia-se com a entrada do ar atmosférico presente na parte superior do veículo através de uma conduta impermeável a partículas sólidas, que filtra o ar antes deste chegar ao compressor.

Em seguida, este é comprimido no compressor de palhetas que é acionado pelo motor eléctrico trifásico.

Posteriormente, o ar passa pela zona de secagem do ar, na qual passará por vários filtros e pelas torres de secagem de modo a que se removam as impurezas, água e óleo presentes neste.

Por fim, o ar passa pela unidade onde é feita uma monitorização da sua pressão, antes de atingir os reservatórios, onde será armazenado até ser necessário que este chegue aos consumidores.

É de destacar que todos os componentes presentes neste processo foram concebidos para trabalhar em condições adversas de temperatura, humidade, vibração e não são sensíveis ao choque.

para que sejam passíveis de trabalhar sob as condições a que os veículos ferroviários estão sujeitos. Assim, todos os equipamentos eletrónicos foram dimensionados de acordo com a norma BS EN 50155:2017 (European Standard EN 50155:2017, 2017) de modo a poderem operar nestas condições.

2.2.2 Motor elétrico

O compressor é acionado por um motor elétrico trifásico assíncrono com dois pares de polos. O motor possui uma carcaça em alumínio, parte frontal em ferro vazado e a traseira é numa liga de aço macio, em que todos os componentes estão preparados para funcionar em condições adversas (Metro do Porto S.A., 2002a).

A rotação do motor elétrico é controlada pela unidade de controlo eletrónica presente na APU, que acionará o motor consoante os valores de pressão lidos pelo pressostato de comando presente na unidade de controlo de pressão.

A fim de dissipar o calor gerado na atividade do motor e evitar um sobreaquecimento nos enrolamentos deste, o motor está acoplado a um ventilador na extremidade do veio oposta à que está ligada ao compressor. Esta solução construtiva revela-se muito eficiente, uma vez que o movimento de rotação do veio aciona o compressor e o ventilador em simultâneo.

2.2.3 Compressor

O motor aciona o compressor através de uma conexão elástica que liga o veio do motor ao do compressor. O compressor usado contém canais nos quais se encontram aprisionadas palhetas capazes de se movimentar longitudinalmente em relação ao centro do rotor do compressor tal como se pode observar na figura 2.4. Como tal, visto que o rotor é excêntrico e pela própria geometria do compressor, as palhetas irão variar a sua distância ao centro do rotor durante a rotação do compressor de modo a diminuir o volume do espaço entre as células onde o ar é aprisionado, comprimindo-o.

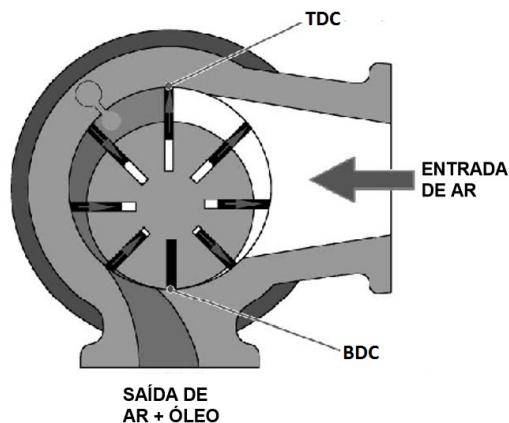


Figura 2.4: Funcionamento do compressor esquematizado (Metro do Porto S.A., 2002b).

Assim, o ar entra nas células entre palhetas quando estas se encontram no ponto TDC (*Top Dead Centre*) que corresponde ao ponto em que o volume entre células é máximo e, como tal, este aumento de volume irá criar uma diminuição de pressão que irá contribuir para a sucção do ar para o interior da célula. Nesta fase é também adicionado óleo ao ar, passando esta mistura a ter 1% de volume de óleo para ajudar na lubrificação do compressor, da válvula de admissão e para dissipar algum calor gerado neste processo (Metro do Porto S.A., 2002b). Além disso, a refrigeração do ar comprimido aumenta a taxa de compressão para o mesmo volume de ar, o que aumentará o rendimento do processo.

Posteriormente, ao longo do movimento do rotor o volume entre células irá diminuir gradualmente para comprimir a mistura, até ser atingido o BDC (*Bottom Dead Centre*), ponto este que corresponde à altura em que o volume da célula é mínimo e o ar sai para um canal que o levará ao filtro do óleo.

Quanto ao modo de funcionamento do motor, este pode trabalhar em carga ou em vazio, modos estes que serão abordados com maior detalhe nas subsecções 2.2.3.1 e 2.2.3.2.

2.2.3.1 Modo em carga

O modo em carga inicia-se quando a pressão lida pelo pressostato de comando presente na unidade de controlo de pressão se encontra abaixo da pressão mínima de funcionamento, isto é, abaixo dos 8.2 bar. Quando tal acontece, o pressostato de comando comunica à unidade de controlo eletrónica e esta deixará de energizar a válvula eletromagnética assinalada com o número 5 presente na figura 2.5, para permitir a entrada de ar no espaço entre palhetas através válvula de admissão assinalada com o número 2, presente na mesma figura, abrindo-a. Isto vai permitir a entrada de uma mistura de ar e com 1 % de óleo no espaço entre palhetas, fazendo com que o compressor passe a funcionar em carga.

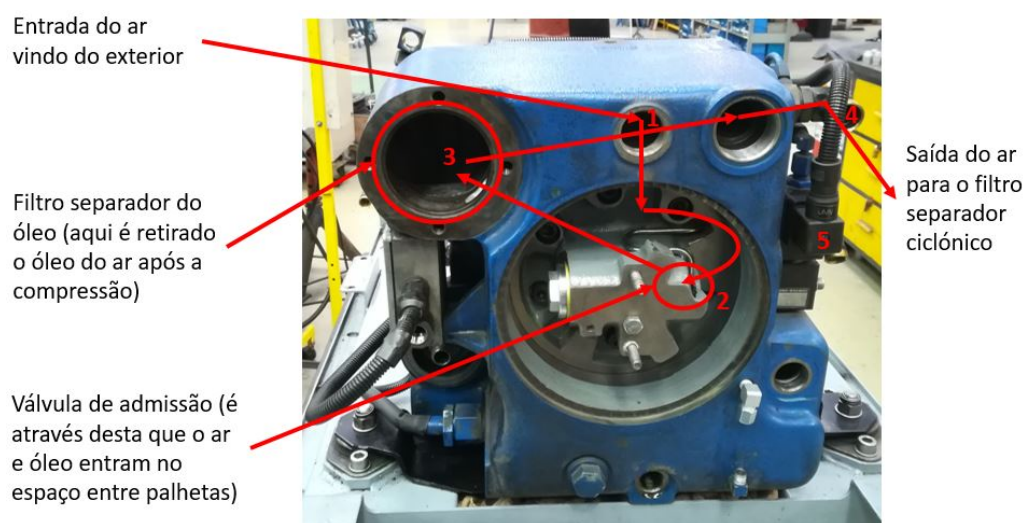


Figura 2.5: Funcionamento do compressor no modo em carga.

Estabelecidas estas condições, o funcionamento em carga inicia-se com a entrada do ar atmosférico (em média com Temperatura = 20 °C e Humidade = 60 %) através da conduta 1 (figura 2.5) que possui um filtro que remove essencialmente impurezas sólidas que o ar atmosférico possa conter através de um tecido permeável ao ar e impermeável a partículas sólidas. Posteriormente o ar entra na célula entre palhetas pela válvula reguladora de admissão e passará pelo processo explicado no início da secção 2.2.3.

Após ser comprimido, o ar entra numa câmara que o encaminhará para o filtro separador do óleo (figura 2.5, ponto 3), no qual será filtrado até atingir um teor de óleo inferior a 5 mg/m^3 (Metro do Porto S.A., 2002b). Por fim, o ar sairá do compressor através de uma válvula anti-retorno.

É de destacar que há mais óleo envolvido na compressão além daquele que entra pela válvula de admissão, no entanto isto será explicado com detalhe na subsecção 2.2.3.3.

2.2.3.2 Modo em vazio

Este modo de funcionamento inicia-se quando a pressão lida no pressostato de comando se encontra acima da pressão de funcionamento do sistema, ou seja, acima de 10.2 bar. Nesse momento a unidade de controlo eletrónico irá acionar a eletroválvula 5 (figura 2.6), de modo a que esta injete ar para fazer com que a válvula de admissão (figura 2.6, ponto 2) fique praticamente fechada, diminuindo o caudal que entra no espaço entre palhetas para cerca de 10 % daquele que entra quando o compressor está a trabalhar em carga (esta válvula não chega a fechar completamente, pois caso tal se sucedesse, iria gerar-se vácuo no espaço entre palhetas). Além disso, a eletroválvula 5 irá abrir a válvula que faz a ligação entre a entrada (figura 2.6, ponto 1) e a saída do compressor (figura 2.6, ponto 4), permitindo a circulação de ar entre estas duas. Assim, o ar ficará a circular entre a entrada e saída do compressor sem que se dê a compressão deste, tal como se pode ver na figura 2.6.

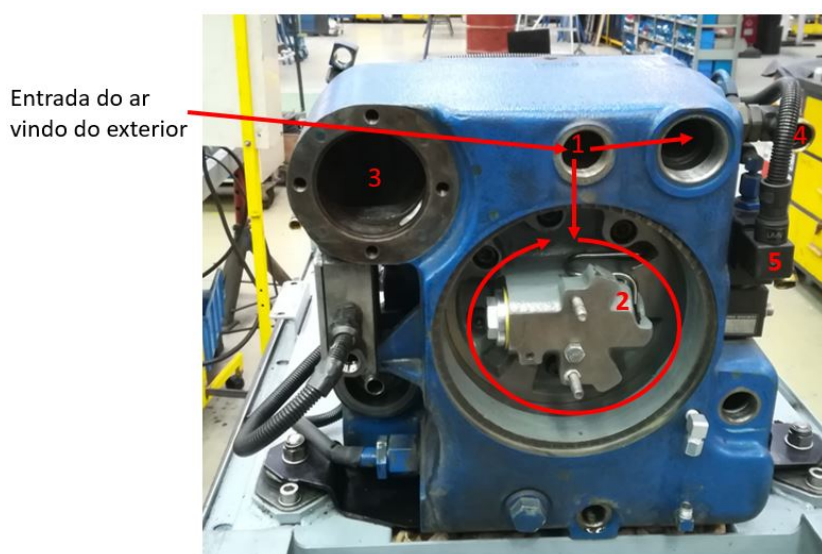


Figura 2.6: Funcionamento do compressor em vazio

É de destacar que o facto do compressor passar a trabalhar em vazio não irá afetar a pressão do ar comprimido presente a jusante deste, uma vez que existe uma válvula de retenção entre o compressor e o resto do sistema de ar comprimido que impede o recuo do ar quando o compressor está a uma pressão inferior à do resto do sistema pneumático.

O funcionamento do compressor em vazio irá diminuir o consumo do motor para 25 % do consumo correspondente a quando trabalha em carga. Esta solução de colocar o compressor a trabalhar em vazio é energeticamente mais rentável do que desligá-lo uma vez que o arranque do compressor é muito dispendioso, sendo mais vantajoso que este continue a trabalhar em vazio caso o tempo deste ciclo não exceda 7 minutos. Caso o compressor esteja a trabalhar em vazio durante mais de 7 minutos, a unidade de controlo eletrónica irá desligá-lo e apenas ligá-lo quando o pressostato de comando detetar uma pressão no sistema inferior a 8.2 bar, altura em que se inicia um novo ciclo de funcionamento e o compressor voltará a trabalhar em carga (Metro do Porto S.A., 2002b).

2.2.3.3 Circuito do óleo

Como já foi referido anteriormente, é adicionado óleo à mistura de ar antes da fase de compressão para lubrificação do compressor e para dissipar parte do calor que se gera na compressão do ar. É de extrema importância que este óleo adicionado tenha uma temperatura a rondar os 75 °C, portanto existe uma resistência para aquecer o óleo, um radiador para arrefecê-lo e um pressostato para monitorizar a temperatura deste.

Assim, inicialmente os 3 L de óleo pertencentes ao sistema encontram-se no reservatório do óleo presente na parte inferior do compressor (figura 2.7, ponto 1). No que toca ao compressor este funcionará como bomba no circuito do óleo, uma vez que o início do movimento de rotação das palhetas irá gerar uma diminuição da pressão na conduta que leva o óleo ao filtro de partículas do óleo (figura 2.7, ponto 2), onde este passará por um tecido que é permeável ao óleo e impermeável a sólidos, perdendo eventuais impurezas que possa conter.

Posteriormente, poderá dar-se um de dois casos:

- Caso o óleo presente no reservatório se encontre a uma temperatura igual ou superior a 75 °C, então o pressostato (figura 2.7, ponto 11) irá acionar a válvula direcional que permite a entrada do óleo na conduta 3 (figura 2.7) e que o leva a percorrer o radiador (de modo a arrefecer o óleo) antes de atingir a conduta 4, por onde este volta a entrar no compressor e será encaminhado para a conduta 5 (figura 2.7) (Metro do Porto S.A., 2002b);
- Caso o óleo presente no reservatório esteja a uma temperatura inferior a 75 °C, então a válvula direcional obrigará o óleo a passar diretamente do filtro separador de partículas do óleo (figura 2.7, ponto 2) para a conduta 5, sem passar pelo radiador (Metro do Porto S.A., 2002b).

Ao entrar na conduta 5, o óleo será encaminhado até ao ponto 6 (figura 2.7), de modo a entrar no espaço entre palhetas (através da entrada 7) a fim de lubrificar o compressor e dissipar o calor da

compressão e, após efetuar um quarto da rotação do compressor, uma parte deste óleo irá continuar a lubrificar o compressor no espaço entre palhetas, enquanto que uma pequena percentagem deste entrará na conduta 8 onde será encaminhado pela conduta entre os pontos 8 e 9 até atingir a válvula de admissão do compressor (figura 2.5, ponto 2) para a lubrificar e entrar juntamente com o ar no espaço entre as palhetas, constituindo, tal como já foi referido, 1 % do volume da mistura que entra nas células (Metro do Porto S.A., 2002b).

Uma vez nas células entre palhetas, o óleo será comprimido juntamente com o ar (até atingir uma pressão superior a 10 bar) e passará através destas até sair juntamente com o ar na zona onde o espaço entre palhetas é mínimo. Aí, visto que o óleo é mais denso do que o ar, grande parte deste cairá no fundo do reservatório (figura 2.7, ponto 1), podendo iniciar o ciclo novamente. No que toca ao óleo que ficou suspenso na mistura gasosa, este passará juntamente com o ar para o filtro separador do óleo (figura 2.7, ponto 10), onde o óleo será retirado e uma parte deste será introduzida novamente no circuito através da conduta 6 (figura 2.7) que o levará novamente para o espaço entre palhetas, enquanto que o resto descerá novamente até ao reservatório do óleo (figura 2.7, ponto 1).

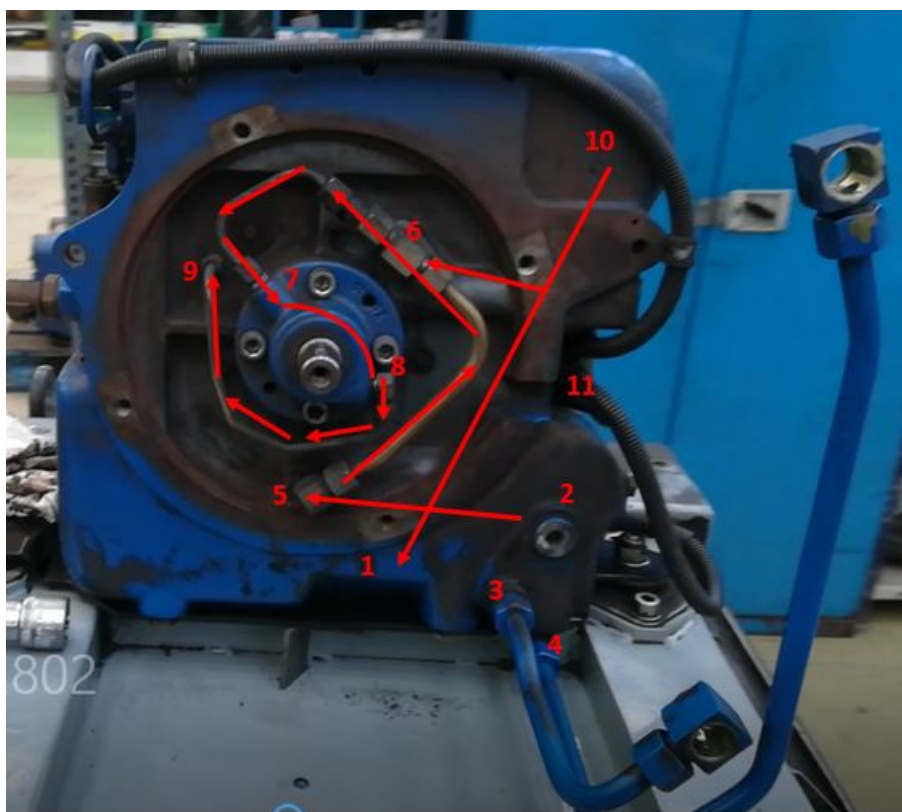


Figura 2.7: Percurso do óleo no compressor.

É de destacar que este óleo nunca é drenado enquanto o veículo se encontra em operação. Como tal, o óleo só é drenado quando é feita a manutenção periódica do veículo, altura em que também é feita a substituição do filtro do óleo por um novo. Assim sendo, o óleo presente no circuito durante a operação é sempre o mesmo.

2.2.4 Filtro separador ciclónico

Logo após sair do compressor o ar sob pressão passará por uma conduta que apresenta várias curvas ao longo do seu caminho e é coberta por alhetas ao longo de toda a sua superfície a fim de dissipar algum calor do ar resultante da compressão.

Em seguida, o ar passa por uma união flexível antes de atingir o filtro separador ciclónico, o qual se pode observar em esquema na figura 2.8. Este filtro encontra-se antes das torres secadoras do ar para filtrar uma grande parte da água antes do ar atingir estas torres, para que este não chegue a estas demasiado húmido, a fim de se preservar os cristais de secagem.

O funcionamento do filtro separador ciclónico baseia-se na separação da água presente no ar com base na diferença das densidades dos dois fluidos, através de uma centrifugação que ocorre devido à elevada velocidade com que o ar entra tangencialmente na câmara ciclónica.

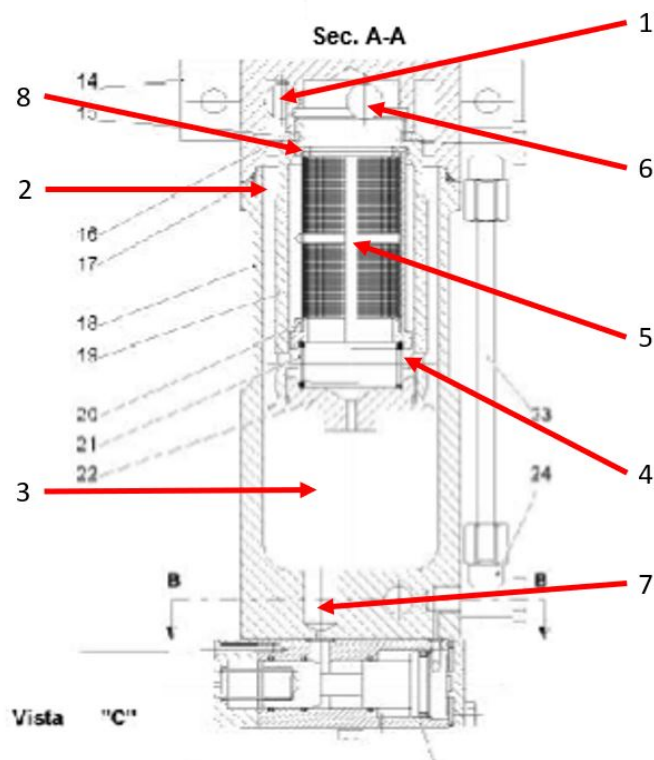


Figura 2.8: Filtro separador ciclónico. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

Assim, o ar húmido entra no filtro separador ciclónico através da entrada 1 presente na figura 2.8 e percorre-o pela sua periferia através da fenda 2 (figura 2.8) até chegar à câmara 3 (figura 2.8). Antes de entrar na fenda 2, o ar passa pela anilha helicoidal 8 (figura 2.8) e, pela geometria desta anilha, tendo em conta que há uma diminuição do volume por onde passa o ar (que pela lei de Bernoulli se reflete num aumento da velocidade do ar no escoamento), este irá adquirir uma velocidade elevada enquanto percorre uma trajetória helicoidal através da fenda 2, criando um micro ciclone. Como consequência, o fluido mais denso (neste caso a água), pelo seu peso mais elevado, terá uma maior tendência para permanecer na trajetória tangente ao escoamento rotativo

e, como tal, irá colidir com as paredes da câmara, perdendo velocidade, o que a fará desacoplar do escoamento do ar, caindo até atingir o fundo da câmara 3, passando em seguida pela conduta 7 (figura 2.8), onde a água será armazenada e posteriormente drenada quando o pressostato de comando detetar uma pressão no painel pneumático acima da pressão de funcionamento (10.2 bar). Em contraste, o ar, visto que é menos denso irá percorrer uma trajetória mais central do micro ciclone, o que o fará entrar no compartimento 5 através do furo 4 (figura 2.8), acabando por subir e eventualmente atingir a saída 6 (figura 2.8) que liga o ar que sai do filtro separador ciclónico em direção às torres de secagem do ar. Todo este processo que ocorre no filtro separador ciclónico é feito para retirar cerca de 80 % da humidade que o ar admitido no compressor possuía (Metro do Porto S.A., 2002a).

2.2.5 Torres secadoras de ar

As torres secadoras de ar são usadas para filtrar o ar a fim de lhe retirar a humidade que ainda lhe resta (idealmente, após passar por estas o ar vai para os reservatórios com um teor de humidade igual a zero).

Cada uma possui um cartucho presente na parte central da torre, composto por grãos de sílica gel (*delsorb 10* ou *delsorb 21*) cujo objetivo é absorver a humidade contida no ar. Este material é geralmente usado neste tipo de aplicações uma vez que estes grãos absorvem a humidade do ar quando por eles passa ar frio (temperatura inferior a 70 °C), e libertam essa humidade absorvida quando por estes passa ar quente (temperatura superior a 70 °C) (Tiwari et al., 2019).

Cada cartucho apresenta duas saídas, uma superior e uma inferior, como será visto posteriormente na figura 2.9. A saída superior liga o cartucho a uma fenda, que é permeável à água e através da qual costuma passar o ar húmido que segue por um canal localizado na zona da periferia da torre e que tem ligação para o exterior. Quanto à saída inferior, esta possui um tecido que é permeável ao ar e impermeável à água no sentido do cartucho para a conduta e possui um bocal que permite a passagem do ar no sentido contrário caso a diferença de pressões entre a conduta e o cartucho vença a força exercida por uma mola aí presente.

Cada torre apresenta duas fases de funcionamento: uma de secagem do ar, e outra de regeneração do granulado desumificador e posterior drenagem da água. Em cada ciclo uma das torres está a fazer a secagem do ar, enquanto que a outra está a expulsar a água absorvida pela mesma no ciclo anterior. Os ciclos são de 1 minuto e são controlados pela eletroválvula A6 (figura 2.9) que, ao acionar as válvulas pneumáticas A1 e A2 presentes na figura 2.9, define em que fase estará cada uma das torres.

Todo este processo de secagem e regeneração das torres pode ser dividido em 4 grandes fases: secagem do ar (câmara I), regeneração do granulado desumificador (câmara II), regeneração da torre secadora de ar (câmara I) e drenagem automática, fases estas que serão descritas nas subsecções da 2.2.5.1 à 2.2.5.4.

2.2.5.1 Secagem do ar (câmara I)

O ar sob pressão e com ainda alguma humidade vindo do filtro separador ciclónico entra pela conduta 1 (figura 2.9) e flui através das tubagens (figura 2.9, seguindo de C1 para C2, C3 e posteriormente para C4), e percorre a torre secadora I pelo seu canal exterior passa pela fenda C5 até atingir o topo da câmara I (C6), tal como se pode verificar no esquema da figura 2.9. Aí o ar passará pela malha de metal e pelos discos de feltro (C7) até atingir o interior da câmara (figura 2.9, C8), local onde estará em contacto com os grãos de sílica gel que irão absorver a água.

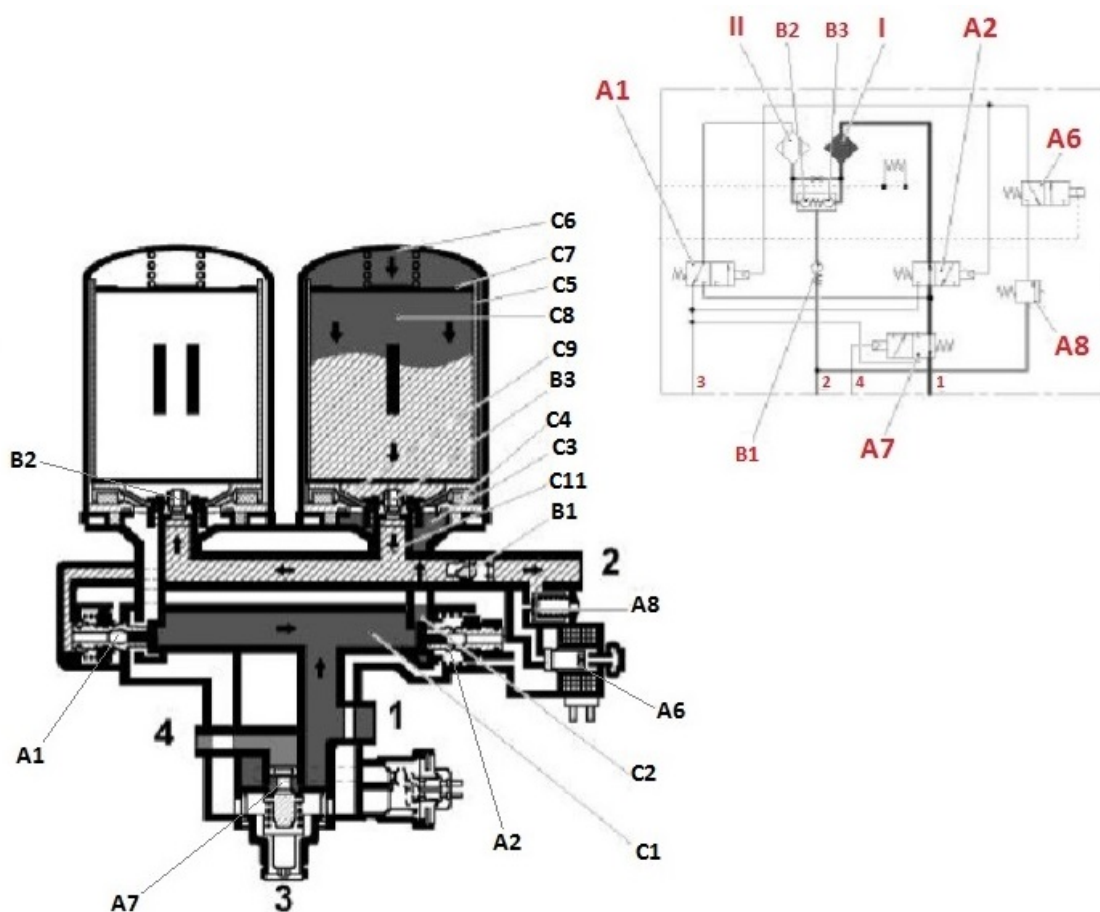


Figura 2.9: Esquema da secagem do ar na câmara I. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

À medida que a pressão vai subindo o ar vai descendo pelos grãos de sílica, passando pelo final da câmara (C9) até atingir a válvula anti-retorno (figura 2.9, B3), que é impermeável à água e permeável ao ar, dá-se a passagem de ar seco para a tubagem C11 (WABCO, n.d.a.). Com a chegada do ar seco comprimido a esta zona da tubagem, a pressão aumentará, permitindo a passagem do ar pela válvula anti-retorno B1 passando para a saída 2, o que levará o ar seco comprimido aos reservatórios de modo a alimentar a rede de consumo. Em simultâneo, o ar sob pressão chega à válvula de alimentação (figura 2.9, A6) que se encontra, nesse instante, ainda fechada (Metro do Porto S.A., 2002b).

2.2.5.2 Regeneração do granulado desumidificador (câmara II)

Simultaneamente com a secagem do ar da câmara I, será necessário abastecer os reservatórios com este mesmo ar seco, assim como drenar o ar contaminado presente na torre II, uma vez que anteriormente esta era a torre que estava a secar o ar. Como tal, o ar seco oriundo da câmara I irá chegar à zona C12 e irá passar através do bocal C13 presente na figura 2.10. Este bocal apresenta um orifício com um tamanho muito reduzido comparativamente com os outros orifícios da base das torres secadoras de ar de modo a dificultar a entrada do ar na câmara II pela parte inferior. Assim, consegue-se garantir que apenas cerca de 12 % a 15 % do ar que é seco na câmara I entrará na câmara II para regenerar os grãos de sílica aí presentes (Delair, 2018). É importante referir ainda que existe uma resistência na zona C12 que está permanentemente ligada quando as torres estão em funcionamento e que aquece o ar seco que por aí passa, garantindo que o ar que entra pela parte inferior da câmara II é quente (WABCO, n.d.b.). Deste modo, a passagem do ar quente pelos grãos de sílica irá remover a humidade que foi retirada do ar que esteve a ser seco na câmara II no minuto anterior. Com isto, o ar (agora contaminado com a humidade que estava nos grãos de sílica) sairá pela parte superior da câmara II (C16, figura 2.10), irá percorrer a torre pela sua periferia através da fenda C17, passa pela câmara C18 e é direcionada pela válvula A1 para a conduta 3 que irá drenar este ar contaminado para o exterior tal como se pode observar na figura 2.10.

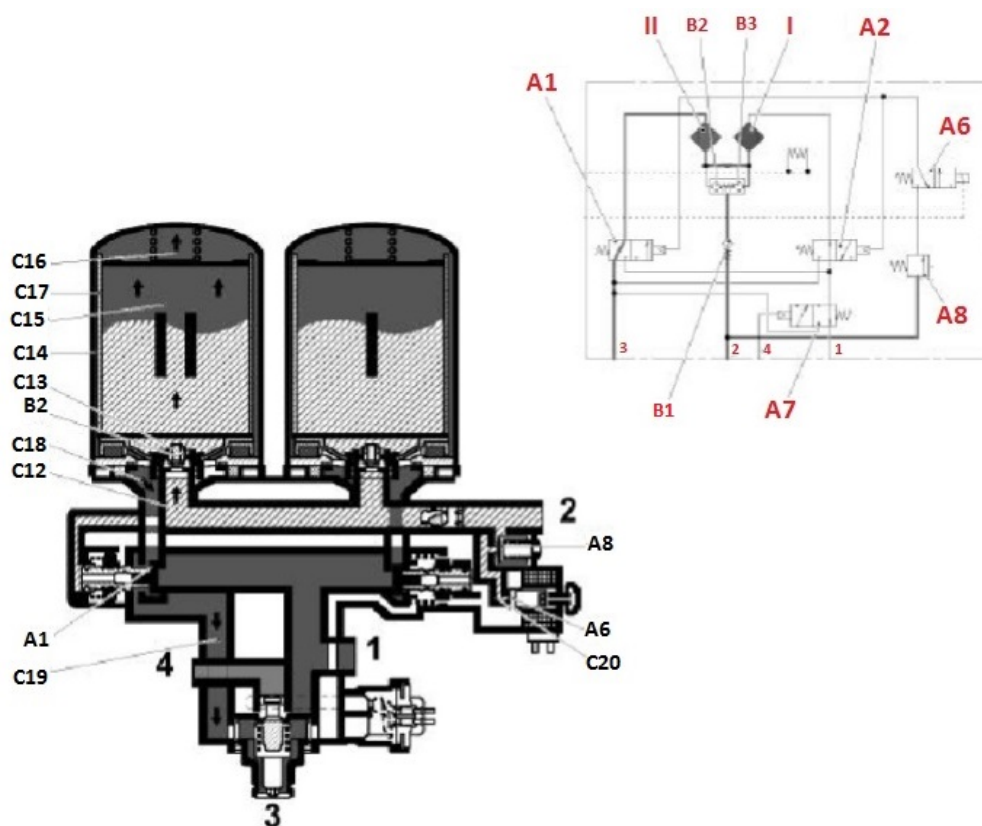


Figura 2.10: Regeneração do granulado desumidificador na câmara II. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

Além disto, a pressão gerada na conduta 2 irá pressionar a válvula A8, que abrirá quando esta pressão exercida atingir 5 bar (WABCO, n.d.b.). Quando tal se suceder, o ar comprimido irá passar a válvula A8 e pressionar a entrada da eletroválvula A6 da figura 2.10.

2.2.5.3 Regeneração da torre secadora de ar (câmara I)

Após a secagem do ar proveniente da torre I e a regeneração da torre II, será necessário realizar o processo inverso em cada uma das torres. Este processo inicia-se quando a eletroválvula A6 muda de posição, válvula esta cujo funcionamento é regulado eletricamente por um temporizador que a faz mudar de posição a cada minuto.

Assim, após 1 minuto a regenerar o cartucho II, o temporizador excita o solenóide da eletroválvula A6 que a abre e deixa passar o ar através da conduta C21 de modo a pilotar as válvulas A1 e A2 tal como se pode observar na figura 2.11. A mudança de posição destas válvulas irá inverter o sentido do fluxo de ar nas duas torres, fazendo com que o cartucho II passe a secar o ar e o cartucho I passe a regenerar os grãos de sílica. É de destacar que a torre que estava anteriormente a secar o ar (neste caso a torre I) terá um pico de drenagem no instante em que se dá a comutação da válvula uma vez que o ar presente no seu interior estará a uma pressão entre os 8.2 e os 10.2 bar e a comutação da válvula vai fazer com que este cartucho passe a estar ligado ao exterior através da conduta 3 (figura 2.11) (Metro do Porto S.A., 2002b).

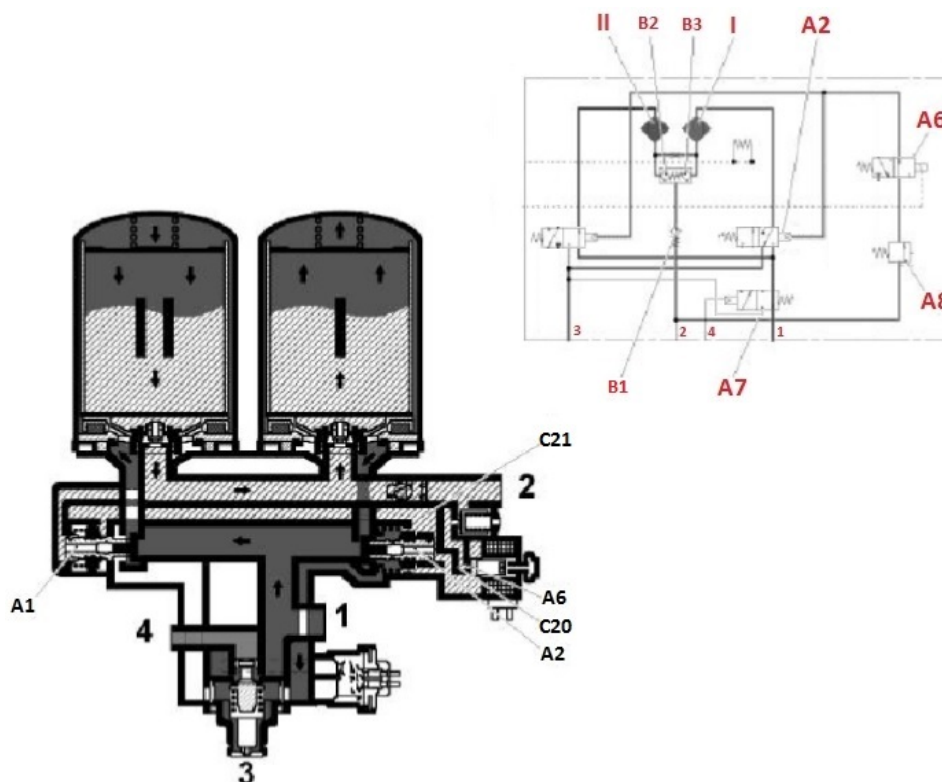


Figura 2.11: Regeneração da torre secadora de ar (câmara I). Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

Deste modo, durante o minuto seguinte o ar vindo da conduta 1 passará através da válvula A1 até percorrer a torre II através da sua fenda localizada na periferia da torre e vai entrar na parte superior desta torre. Este ar frio, vai passar pelos grãos de sílica da torre I que irão absorver a humidade contida neste. Depois o ar abandonará a torre através da sua parte inferior e passará pela zona C12, onde se encontra a resistência que vai aquecer este ar seco. A maior parte deste ar será conduzida para os reservatórios através da conduta 2 (figura 2.11), enquanto que uma percentagem que ronda entre 12 a 15 % do ar seco entrará na câmara I através do bocal inferior e, por estar quente irá remover a humidade presente na sílica gel que está nessa torre, drenando a mesma através da conduta 3 tal como se pode verificar no esquema da figura 2.11 (Delair, 2018).

Todo este processo irá desempenhar-se durante 1 minuto. No final deste intervalo de tempo, a eletroválvula A6 deixará de ser energizada e como tal comutará para a sua posição de repouso, o que reiniciará a secagem do ar da câmara I, tornando todo este processo cíclico.

2.2.5.4 Drenagem automática

Assim que é atingida a pressão limite de funcionamento, ou seja, 10.2 bar, o pressostato de comando presente na zona de controlo de pressão irá comunicar esta informação à unidade de controlo eletrónico, que irá energizar uma electroválvula que vai injetar ar na conduta 4, de modo a comutar a válvula A7, permitindo que o ar presente em ambas as torres possa ser expelido, tal como se pode verificar na figura 2.12.

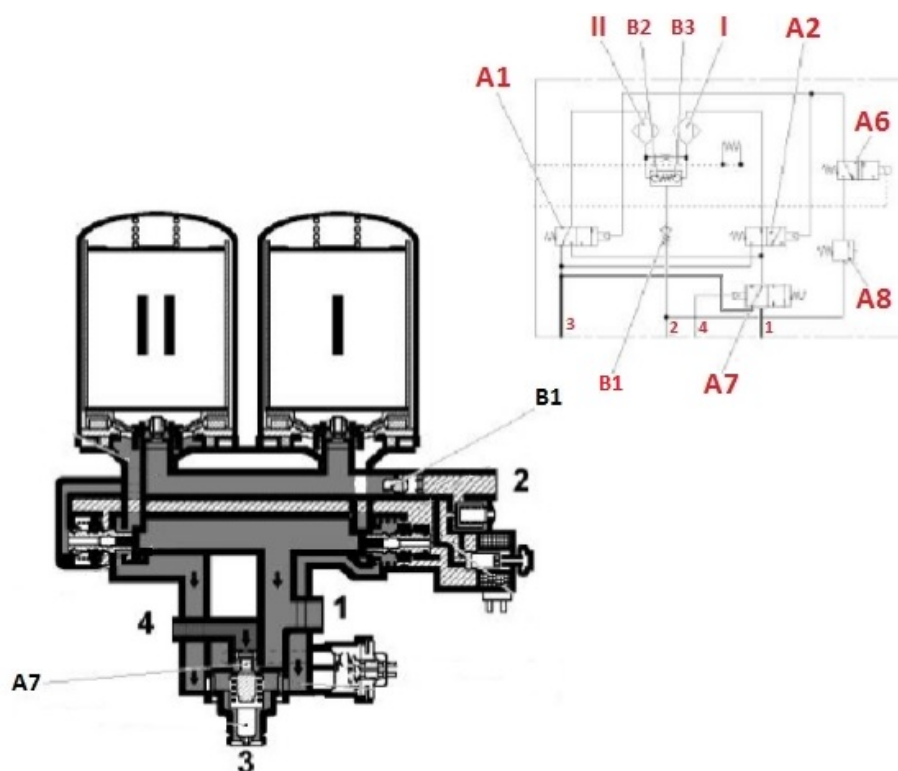


Figura 2.12: Drenagem automática. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

A drenagem automática é feita nesta altura, pois além de baixar a pressão da APU quando esta atinge o seu valor limite máximo de funcionamento, também assegura que a humidade presente em todas as condutas da base das torres secadoras de ar é drenada (Metro do Porto S.A., 2002b).

É importante ter em conta que as torres secadoras do ar apenas estão em funcionamento quando o compressor está a trabalhar em carga. Quando o compressor começa a trabalhar em vazio, o processo de secagem do ar desenvolvido nas torres será inibido e o tempo que a última torre secadora esteve em funcionamento será guardado numa memória na unidade de controlo eletrónico, para que da próxima vez que o compressor entrar em funcionamento em carga a torre em questão finalize o seu ciclo de funcionamento.

2.2.6 Válvulas direccionais

Tal como se constatou na secção anterior, existem várias válvulas na APU que definem o comportamento desta. Para facilitar a localização de algumas destas na APU, na figura 2.13 pode-se ver um esquema com a localização das mesmas na APU, assim como a designação de cada uma.

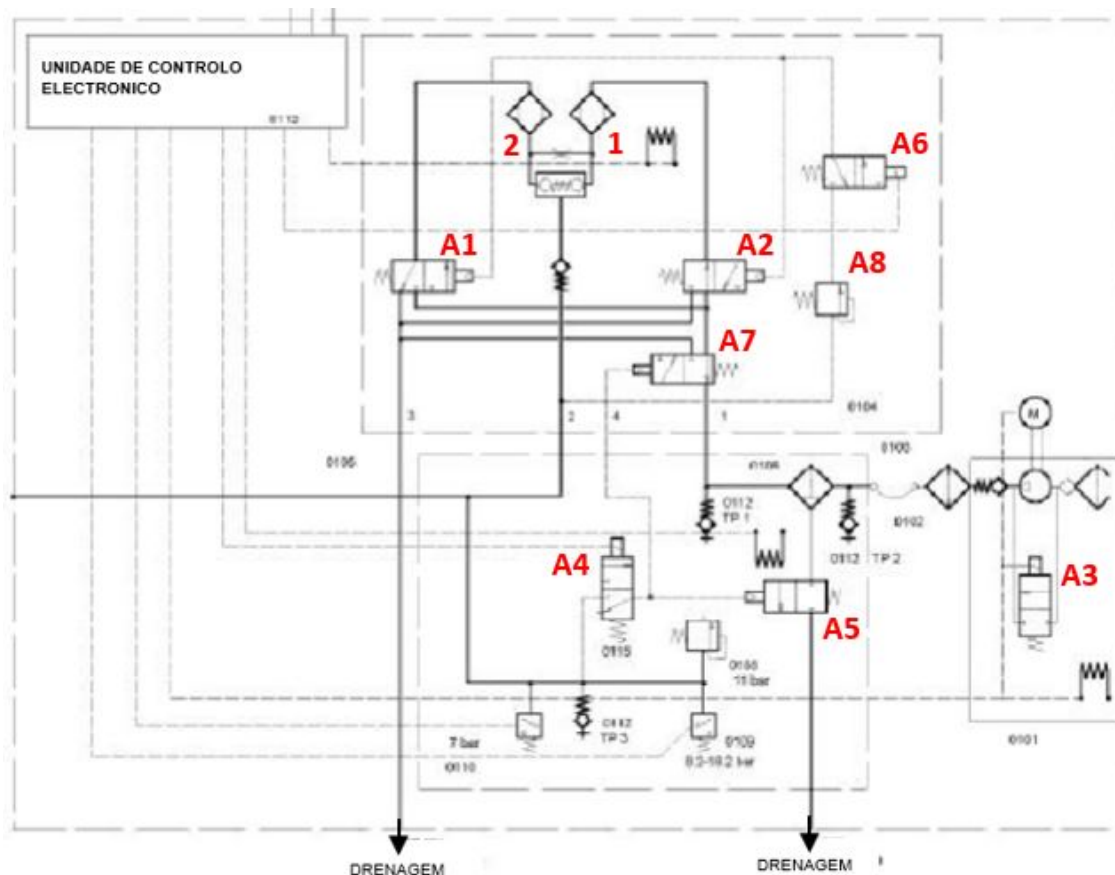


Figura 2.13: Válvulas presentes na APU. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

2.2.7 Pressostato de comando

A fim de monitorizar a pressão do ar presente no sistema através do controlo da atividade do compressor, existe um pressostato de comando no sistema. Este equipamento será o principal responsável por manter a pressão do sistema dentro dos limites de pressão de funcionamento estipulados para o sistema, ou seja, entre 8.2 e 10.2 bar.

Como tal, quando a pressão do sistema se encontrar abaixo dos 8.2 bar, o pressostato irá comunicar à unidade de controlo eletrónico e esta irá energizar a válvula eletromagnética A3 (figura 2.13) que abrirá a fim de permitir que o compressor comece a trabalhar em carga, aumentando a pressão no sistema (Metro do Porto S.A., 2002a).

Por outro lado, caso a pressão na APU se encontre acima dos 10.2 bar, o pressostato irá comunicar à unidade de controlo eletrónico para que esta não energize a eletroválvula supracitada, passando este a trabalhar em vazio para que a pressão no sistema diminua. É nesta altura também que a eletroválvula A4 (figura 2.13) é acionada para que esta pilote pneumáticamente a válvula A7 para efetuar a drenagem das torres secadoras do ar e a válvula A5 para drenar a humidade presente no filtro separador ciclónico (Metro do Porto S.A., 2002a).

2.2.8 Eletroválvula de comando de drenagem (A4)

Para permitir a drenagem do filtro separador ciclónico e das torres de secagem quando o sistema apresenta uma pressão acima da pressão de funcionamento, colocou-se uma eletroválvula de comando de drenagem.

A unidade de controlo eletrónico aciona esta válvula quando a pressão lida pelo pressostato de comando é superior à pressão de funcionamento (10.2 bar), abrindo-a. Assim, a válvula irá deixar passar ar pressurizado que vai acionar a válvula que efetua a descarga da água filtrada no filtro separador ciclónico e a descarga das torres secadoras do ar.

2.2.9 Válvula de segurança

Como medida de precaução em caso de avaria do pressostato de comando, existe uma válvula de segurança no sistema. Esta válvula está calibrada para abrir e libertar ar sob pressão para o exterior caso a pressão no sistema exceda os 11 bar (Metro do Porto S.A., 2002a). Esta informação, apesar de redundante é vital, pois caso a pressão no sistema exceda estes valores poderá provocar danos irreparáveis nos seus componentes.

Quanto à constituição, a estrutura da válvula é em bronze e tem uma anilha e uma mola em aço que se move o suficiente para abrir um pouco a válvula quando pressionada por mais do que 11 bar.

2.2.10 Pressostato de pressão mínima (pressostato de alarme)

Da mesma maneira que é colocado um componente para medir as pressões excessivamente altas, também existe um pressostato de alarme que indica se a pressão se encontra abaixo dos 7

bar, informação esta que pode ser vital em caso de avaria do pressostato de comando (Metro do Porto S.A., 2002a).

Este pressostato pode ser calibrado por um parafuso, no entanto, em todos os veículos Eurotram da Metro do Porto, está calibrado para detetar uma pressão abaixo de 7 bar. Quando tal acontece, esta informação passa para a unidade de controlo eletrónico que irá informar o condutor do veículo através de uma indicação que aparecerá no painel de controlo do veículo. Posteriormente, o condutor deverá fazer a despreparação do veículo e esperar para que a pressão na APU suba até um valor superior a 7 bar, podendo aí retomar a marcha. Caso tal não aconteça ao fim de uns minutos, o condutor deverá informar o PCC (Posto Central de Comando) de que o veículo não se encontra em condições para circular e este será obrigado a ser retirado de linha de acordo com as normas estabelecidas pelo protocolo redigido para este tipo de situações.

Este tipo de situações pode ocorrer por várias causas diferentes, mas geralmente as avarias que fazem com que a pressão na APU fique abaixo dos 7 bar ocorrem devido a fugas na rede de ar comprimido a jusante da APU.

2.2.11 Reservatórios de ar comprimido

Com o intuito de armazenar ar comprimido antes deste ser distribuído pelos consumidores e de impedir grandes variações de pressão repentinas na APU, existem dois reservatórios, cada um com 60 litros de capacidade, montados numa estrutura ao lado da unidade de compressão e tratamento do ar.

O objetivo da colocação dos reservatórios reside no facto de que por vezes, durante um certo intervalo de tempo, a quantidade de ar comprimido consumido é superior à quantidade de ar comprimido que é produzido no compressor, sendo necessário haver sempre ar armazenado para estas ocasiões. A presença dos reservatórios diminui assim as variações bruscas da pressão do ar comprimido no sistema. Além disso, a expansão do ar neste componente possibilita uma maior troca de calor entre o compressor e o exterior, pelo que permite que se dê uma diminuição da temperatura do ar comprimido. Os reservatórios aumentam ainda o tempo dos ciclos de funcionamento do compressor, o que melhora muito a eficiência energética do sistema, diminuiu o desgaste das peças do compressor e, como tal, alarga o tempo de vida útil deste e minimiza os gastos na sua manutenção.

Os reservatórios são montados em paralelo, estão equipados com uma válvula de drenagem que nunca é aberta em funcionamento normal do sistema de ar comprimido (é usada para esvaziar os reservatórios quando o veículo apresenta uma avaria), são fabricados em aço-inox (Metro do Porto S.A., 2002a) e estão preparados para suportar bem a pressão máxima admissível do sistema (11 bar) e a sua instalação respeita a Instrução Técnica Complementar para Recipientes Sob Pressão de Ar Comprimido em vigor.

Capítulo 3

Manutenção e métodos de análise de falhas

3.1 Manutenção

Dá-se o nome de manutenção ao processo ou processos físicos que são feitos em equipamentos ou componentes de um sistema a fim de garantir que estes continuam a executar as tarefas exigidas pelo consumidor (Oliveira, 2015). Este conceito tem sofrido algumas alterações ao longo dos anos, podendo destacar-se 3 tipos de abordagens diferentes de implementação de planos de manutenção, que são a manutenção corretiva, preventiva e preditiva. Cada uma destas caracteriza uma diferente geração na história da manutenção, em que cada uma apresenta um leque de diferentes ideais que foram mudando ao longo dos tempos devido ao avanço tecnológico, que permitiu aprofundar o conhecimento do comportamento dos equipamentos ao longo da sua utilização. Toda esta evolução pode ser observada no diagrama temporal da figura 3.1.

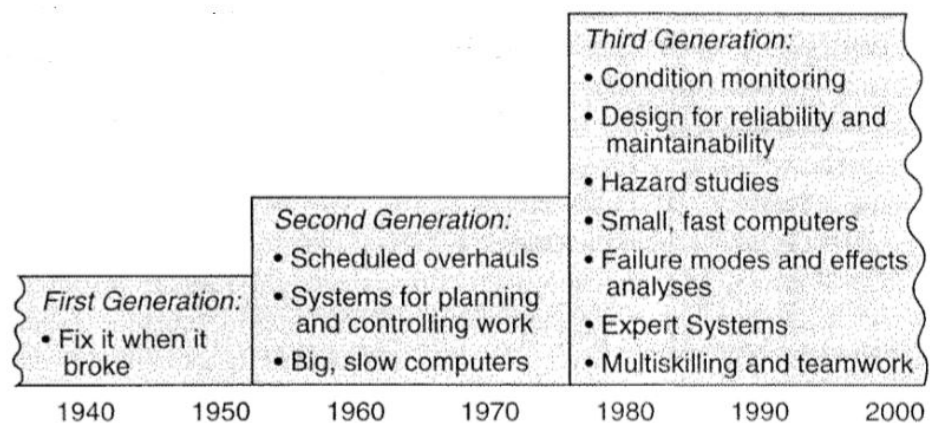


Figura 3.1: Evolução da manutenção (Moubray, 1997).

Assim, na primeira geração apenas era feita manutenção dos equipamentos quando estes apresentavam avarias (metodologia de manutenção corretiva, também apelidada de *run to failure maintenance*).

Com o final da Segunda Guerra Mundial, a indústria tornou-se muito mais dependente das máquinas, o que fez com que as avarias destas tivessem um custo muito maior, levando grande parte dos gestores industriais a optar por realizar um planeamento de manutenções periódicas para diminuir o número de avarias.

Os avanços tecnológicos geraram, na década de 1970, a terceira geração de técnicas de manutenção, a qual se caracteriza por uma manutenção baseada na condição dos componentes, isto é, a manutenção preditiva. Esta manutenção resulta de uma comunhão entre a natureza dos componentes com a operação a que são sujeitos e rege-se muito pela monitorização da atividade dos equipamentos para definir a condição destes.

Todas estas técnicas de manutenção serão tratadas nas secções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3.

3.1.1 Manutenção corretiva

A primeira geração da história da manutenção, caracteriza-se por uma manutenção meramente corretiva, ou seja, apenas era feita a manutenção dos equipamentos quando estes deixavam de desempenhar as suas funções de forma total ou parcial. Assim, cada vez que havia uma avaria num equipamento, o componente que seria (provavelmente) o responsável pela avaria, era substituído, não havendo nenhuma ação feita de modo a tentar evitar a falha desse mesmo componente.

Esta técnica era usada antes da Segunda Guerra Mundial, período este no qual a indústria se encontrava numa fase embrionária e muito pouco mecanizada. Como tal, a prevenção de falhas não era uma das grandes preocupações dos gestores da indústria, uma vez que estas falhas não causavam grande prejuízo.

Por outro lado, nesta altura os equipamentos não eram muito complexos e grande parte destes eram sobredimensionados, o que os tornava robustos e pouco suscetíveis a avarias.

Apesar de não haver grandes estudos relativos à evolução das avarias das máquinas, naquela altura acreditava-se que todos os equipamentos apresentavam uma curva da taxa de probabilidade de falha idêntica à do gráfico da figura 3.2. Acreditava-se que os equipamentos apresentavam uma taxa de falhas constante desde o início do seu funcionamento, até atingir o final do seu ciclo de vida útil, altura a partir da qual a taxa de falhas aumentavam exponencialmente.

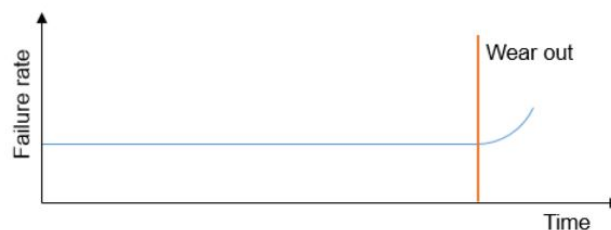


Figura 3.2: Curva da taxa de falhas segundo a primeira geração da manutenção (Oliveira, 2015).

3.1.2 Manutenção preventiva

Posteriormente, após a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento exponencial do uso das máquinas em detrimento da mão de obra. A indústria passou a ter uma enorme dependência das máquinas e as avarias começaram a acarretar consequências muito negativas ao nível da segurança e grandes perdas a nível económico.

Como solução, por volta da década de 1950 passou-se a tomar medidas a fim de tentar evitar ou minimizar as falhas, isto é, passou-se a fazer uma manutenção preventiva (Moubray, 1997). Esta metodologia de manutenção visa o melhoramento ou a substituição de certos componentes de um sistema baseado no ciclo de vida útil de cada equipamento, de modo a que se utilize cada componente durante um grande período de tempo, mas que este seja substituído antes de provocar avarias.

Nesta altura acreditava-se que os componentes de uma máquina apresentavam uma taxa de falhas com uma curva como a mostrada no gráfico da figura 3.3, vulgarmente conhecida como curva em banheira. Tal como se pode observar, há uma grande probabilidade de ocorrência de falhas quando um componente entra em funcionamento (zona de mortalidade infantil), uma vez que certos componentes apresentam defeitos de fabrico ou são montados de modo incorreto, havendo uma grande taxa de falhas quando estes são implementados no sistema. Em seguida, apresenta-se o período de vida útil de um componente, período durante o qual a taxa de falhas do componente é mais baixa e constante. Por último, atinge-se uma nova subida no gráfico, uma vez que devido a vários fatores, como por exemplo a corrosão ou fadiga dos materiais, a taxa de falha dos componentes apresenta uma subida acentuada. Assim, a manutenção preventiva baseava-se numa substituição agendada antes de ser atingida a subida da taxa de falhas devido a desgaste.

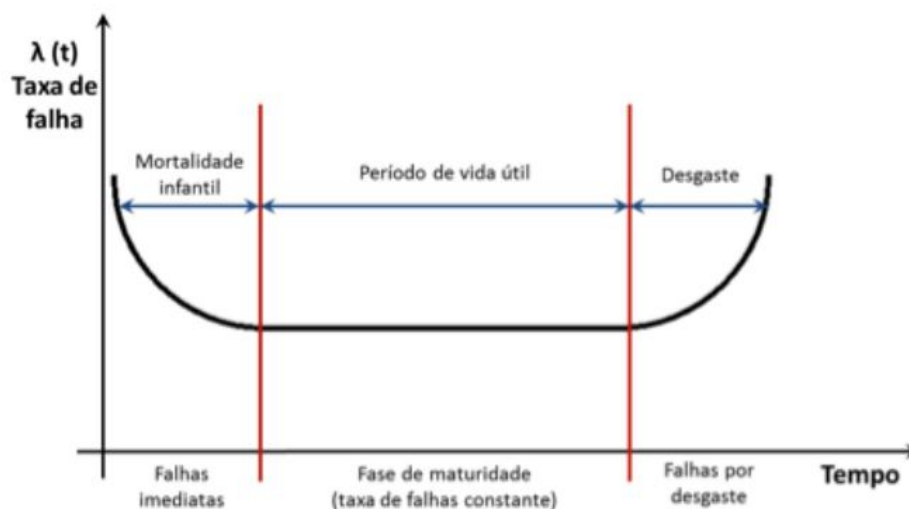


Figura 3.3: Curva da taxa de falhas de um gráfico em banheira (de Oliveira Viana et al., 2017).

No entanto, esta metodologia de manutenção apresentava algumas lacunas, uma vez que, nem todos os componentes apresentam o mesmo tempo de vida útil. Como tal, torna-se difícil escolher uma boa altura para fazer a substituição de todos os componentes (processo este que se designa de

fazer o *overhaul*). De acordo com este modelo, geralmente são agendadas pequenas manutenções periódicas para fazer manutenção dos componentes mais baratos que geralmente apresentam mais desgaste (substituição de *o'rings* e anilhas e limpeza dos filtros) e são feitas manutenções agendadas menos frequentes para fazer o *overhaul* pouco antes de se atingir o fim do tempo de vida útil dos componentes mais caros.

Por outro lado, ao contrário do que se pensava antes da Segunda Guerra Mundial, nem todos os componentes apresentam uma curva de taxa de falhas como a curva em banheira (figura 3.4, gráfico 1). Vários componentes manifestam uma taxa de falhas constante durante o seu ciclo de vida útil e, posteriormente, a taxa de falhas tende a aumentar devido ao desgaste (figura 3.4, gráfico 2), outros simplesmente têm uma taxa de falhas que aumenta de uma forma constante e não muito acentuada ao longo do tempo (figura 3.4, gráfico 3). Existem ainda componentes que exibem uma curva da taxa de falhas com uma forma logarítmica (figura 3.4, gráfico 4), outros que apresentam uma taxa de falhas sempre constante ao longo do seu ciclo de vida (figura 3.4, gráfico 5) e por fim há componentes que possuem uma taxa de mortalidade infantil muito elevada e, posteriormente, falhas aleatórias ao longo do seu ciclo de vida (figura 3.4, gráfico 6).

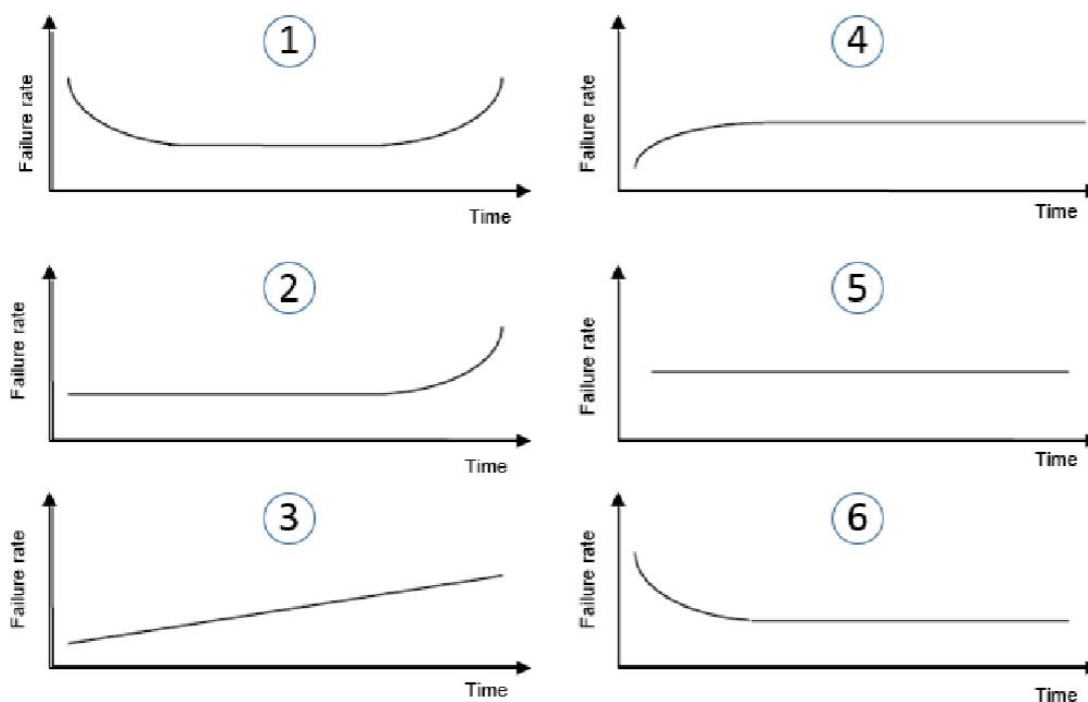


Figura 3.4: Vários tipos de distribuições dos ciclos de vida de componentes (Oliveira, 2015).

Ao analisar estas curvas pode-se concluir que muitas das manutenções preventivas agendadas e feitas vêm introduzir falhas em equipamentos que se encontram em perfeitas condições de funcionamento, uma vez que a introdução de novos componentes aumenta a taxa de falhas devido a mortalidade infantil. Como tal, a indústria evoluiu no sentido de criar um modelo de manutenção baseado na condição dos componentes.

3.1.3 Manutenção preditiva

Assim, na década entre 1970 e 1980 surgiu a terceira geração de técnicas de manutenção. Esta nova metodologia, intitulada de manutenção preditiva assenta na monitorização do comportamento dos equipamentos a fim de detetar a presença de uma falha no sistema antes que esta gere consequências que possam afetar o consumidor (Freitas, 2019). Deste modo, é feito um estudo de todos os modos de falha possíveis e das consequências e causas que vêm de cada um, assim como das correções possíveis para cada problema.

Com este avanço, é possível detetar as causas de cada avaria e, como tal, fazer a manutenção apenas do componente que gerou a avaria. Esta abordagem mostra-se muito vantajosa pois diminui o número de avarias após manutenção, uma vez que ao afetar apenas o componente gerador da falha não se introduzem novos modos de falha no sistema devido à mortalidade infantil dos novos componentes introduzidos sem necessidade. Uma boa implementação deste tipo de sistemas além de diminuir drasticamente o número de avarias pós manutenção, pode corrigir falhas antes que estas causem avarias que possam afetar o consumidor caso as falhas sejam detetadas e corrigidas antes de ocorrerem consequências provenientes da falha.

Além disso, é economicamente mais rentável porque a manutenção só é aplicada aos componentes que necessitam desta, não havendo gastos desnecessários em componentes.

3.2 Métodos de análise de falhas

A análise de falhas começou a desenvolver-se por volta da Segunda Guerra Mundial. Existem vários métodos de análise de falhas e inclusive várias normas de análise de falhas, como são o caso da NES45-RCM (muito usada na indústria naval e na marinha), a ATA-MSG-3 (criada com o intuito de ser usada pela indústria aeronáutica) e a SAE JA1011/1012 (usada na indústria automóvel), RCM - *Reliability Centered Maintenance* (que será o método usado no presente estudo), entre outros.

No entanto, independentemente do método de análise de falhas utilizado, geralmente é necessário recorrer à elaboração de tabelas FMEA ou FMECA a fim de aplicar o processo.

3.2.1 FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)

O FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é um método de análise das falhas e avarias potenciais que podem ocorrer num sistema, cuja finalidade é fazer um controlo e monitorização dessas falhas de modo a diminuir ou eliminar os danos causados pelas mesmas (Freitas, 2019). É também usado para se fazer estudos da fiabilidade de sistemas e baseia-se no preenchimento de uma tabela FMEA, cujo processo será mostrado mais à frente nesta secção.

Foi desenvolvido pela unidade militar dos E.U.A. na década de 1940 com o intuito de estudar os problemas que possam surgir a partir de falhas de sistemas militares. Hoje em dia, é muito usado na criação ou reestruturação de um novo produto ou serviço, para o desenvolvimento do plano de controlo ou implementação de melhorias ou alterações num processo ou produto e para

a implementação ou alteração em sistemas de manutenção, tal como acontece com o caso em estudo.

3.2.1.1 Vantagens do FMEA

Uma análise FMEA possibilita um aumento da robustez de um produto, podendo diminuir o número de falhas deste e aumentar a satisfação e confiança do consumidor no fabricante. Como tal, uma análise FMEA de um produto pode aumentar a competitividade de uma empresa, uma vez que pode levar a uma diminuição de falhas nos seus produtos.

Visto que o FMEA se baseia numa análise do registo histórico de um sistema ou produto, quer seja a análise das suas falhas e avarias, alterações ao projeto e até mesmo das melhorias implementadas, então é um processo através do qual é possível conhecer o comportamento do sistema, o que poderá ajudar a implementar soluções de otimização do mesmo, quer seja na qualidade do produto ou do processo de fabrico, como também na redução de tempo e de custos no desenvolvimento do mesmo.

3.2.1.2 Processo FMEA

O processo de análise FMEA inicia-se com um estudo do mecanismo e da finalidade do processo em causa. Geralmente é feita uma análise detalhada de cada componente a fim de saber a função de cada um no sistema (e de poder inferir a importância deste) e de cada modo de falha dos componentes, e só depois uma análise geral dos modos de falha do sistema como um todo. É necessário definir se o sistema em análise é o projeto ou revisão do projeto de um produto ou se se está perante a análise de um processo novo ou revisão de um processo já existente.

Posteriormente é necessário fazer uma análise detalhada dos possíveis modos de falha que podem ocorrer neste, isto é, uma análise das formas possíveis de ocorrência de uma falha num equipamento, ou numa parte do sistema. Além da identificação dos vários modos de falha, deverão também ser destacadas as possíveis causas para cada modo de falha, sendo que todas estas informações deverão ser registadas na tabela FMEA.

Geralmente recorre-se a uma análise detalhada do historial ou de relatórios de falhas do sistema de modo a poder inferir os modos de falha mais comuns e as suas causas no caso de se estar perante uma reestruturação, melhoria, ou análise de um sistema existente.

3.2.2 FMECA (*Failure Mode, Effects & Criticality Analysis*)

O método de análise FMECA inicia-se com o preenchimento de uma tabela FMEA. Sucessivamente, será avaliada a criticidade de cada um dos modos de falha, ou seja, cada um dos modos de falha será avaliado em diferentes parâmetros (severidade, ocorrência e deteção da falha) e através das classificações atribuídas a cada um destes parâmetros será calculado o RPN (*Risk Priority Number*) de cada modo de falha, o qual deverá ser usado para definir o grau de urgência da tomada de medidas corretivas e preventivas para a diminuição de cada modo de falha (Freitas, 2019). Todas estas informações deverão ser registadas na tabela FMECA.

As tabelas FMECA não possuem um modelo normalizado, no entanto tendem a seguir um modelo semelhante ao modelo apresentado na tabela FMECA apresentada no Anexo A, a qual foi feita para a unidade de produção de ar comprimido em estudo neste trabalho de dissertação.

3.2.2.1 Severidade (S)

Inicialmente, serão avaliadas as consequências que advêm de cada modo de falha e que possam afetar tanto o sistema, como os sistemas adjacentes, o processo, o produto, o consumidor ou o cumprimento das normas existentes.

Cada uma destas consequências será classificada segundo o seu grau de severidade (S), numa escala de 1 a 10 de acordo com os patamares definidos na tabela 3.1. No caso de haver mais do que uma consequência para um mesmo modo de falha, o grau de severidade dessa falha será o valor do grau de severidade da consequência mais catastrófica para esse modo de falha.

Tabela 3.1: Grau de severidade da falha (S). Adaptado de Siqueira Campos (2019).

Efeito	Severidade do Efeito no Cliente	Severidade do Efeito na Manufatura	Índice de Severidade
Perigoso sem aviso prévio	Modo de falha afeta a segurança na operação do veículo ou envolve não-conformidade com a legislação governamental sem aviso prévio	Pode pôr em perigo o operador sem aviso prévio.	10
Perigoso com aviso prévio	Modo de falha afeta a segurança na operação do veículo ou envolve não-conformidade com a legislação governamental com aviso prévio	Pode pôr em perigo o operador com aviso prévio	9
Muito alto	Veículo inoperável (perda das funções primárias)	100 % dos equipamentos podem ter que ser sucateados	8
Alto	Veículo operável, mas com níveis de desempenho reduzido	Os componentes podem ter que ser selecionados e uma parte (menor que 100 %) sucateada	7
Moderado	Veículo operável, mas com déficit de conforto/conveniência	Uma parte (menor que 100 %) dos componentes podem ter que ser sucateados sem seleção	6
Baixo	Veículo operável, mas com níveis de conforto/conveniência com desempenho reduzidos	100 % dos componentes podem ter que ser retrabalhados, ou veículo reparado fora da oficina.	5
Muito baixo	Itens de ajuste, acabamento e barulho não-conformes. Defeito notado pela maioria dos clientes (mais que 75 %)	Alguns componentes podem ter que ser selecionados, sem sucateamento e uma parte ser retrabalhada	4
Menor	Itens de ajuste, acabamento e barulho não-conformes. Defeito evidenciado por 50 % dos clientes	Uma parte dos componentes podem ter que ser retrabalhados, sem sucateamento, na linha mas fora da estação	3
Muito menor	Itens de ajuste, acabamento e barulho não-conformes. Defeito evidenciado por alguns clientes (menos que 25 %)	Uma parte (menor que 100 %) dos produtos podem ter que ser retrabalhados, sem sucateamento, na linha e dentro da estação	2
Nenhum	Sem efeito identificado	Pequena inconveniência no operador ou na operação, ou sem efeito	1

3.2.2.2 Ocorrência (O)

Em seguida, será calculada a probabilidade de ocorrência da falha (O), para uma determinada causa e será atribuído um número a esta mesma probabilidade numa escala de 1 a 10, em que 1 corresponde ao grau mínimo de ocorrência de falha e 10 significa que a falha é inevitável, tal como se pode ver na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Grau de ocorrência da falha (O). Adaptado de Siqueira Campos (2019).

Probabilidade de Falha	Taxas de falha possíveis	Índice de ocorrência
Muito Alta: Falhas persistentes	100 por mil peças	10
	50 por mil peças	9
Alta: Falhas frequentes	20 por mil peças	8
	10 por mil peças	7
Moderada: Falhas ocasionais	5 por mil peças	6
	2 por mil peças	5
	1 por mil peças	4
Baixa: Relativamente poucas falhas	0,5 por mil peças	3
	0,1 por mil peças	2
Remota: Falha é improvável	$\leq 0,01$ por mil peças	1

3.2.2.3 Detecção (D)

Para cada causa de modo de falha, deve ser feita a identificação dos processos de monitorização das falhas. Estes processos são usados a fim de detetar a presença, ou possibilidade de ocorrência de uma falha para que seja feito algo a fim de corrigir a falha ou diminuir os danos antes que o cliente possa ser afetado. Para cada processo de monitorização, existe um grau de deteção do modo de falha (D), que estima a assertividade da deteção dessa mesma falha. A classificação do grau de deteção do modo de falha é feita baseada na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Grau de detecção da falha (D). Adaptado de Siqueira Campos (2019).

Detecção	Critério	Tipos de inspeção			Métodos de Detecção	Índice de Detecção
		A	B	C		
Quase impossível	Certeza da não detecção.			X	Indetetável ou não é verificado.	10
Muito remota	Provavelmente não detetada.			X	Verificação aleatória ou indireta.	9
Remota	Pouca chance de detecção.			X	Inspeção visual.	8
Muito Baixa	Pouca chance de detecção.			X	Dupla inspeção visual.	7
Baixa	Detetável.		X	X	Métodos gráficos ou controlo estatístico do processo.	6
Moderada	Detetável.		X		Medições por variáveis quando as peças deixam a estação, ou em medições do tipo passa/não-passa feitas em todas as peças que deixam a estação.	5
Moderadamente alta	Provavelmente detetável.		X		Detecção de erros em operações subsequentes, medições feitas na preparação da máquina ou na verificação da primeira peça.	4
Alta	Provavelmente detetável.	X	X		Detecção de erros na estação, ou em operações subsequentes por múltiplos níveis de aceitação: fornecer, seleccionar, instalar, verificar.	3
Muito alta	Quase certo que é detetada.	X	X		Detecção de erros na estação (medição automática).	2
Quase certamente	Quase certo que é detetada.	X	X		Peça feita à prova de erros pelo projeto do processo/produto.	1

Assim, através do produto entre o grau de severidade (S), a probabilidade de ocorrência (O) e o grau de detecção (D) chega-se ao valor do *Risk Priority Number* (RPN), o qual traduz o grau de prioridade de correção daquele modo de falha.

$$RPN = S \cdot O \cdot D \quad (3.1)$$

Com os vários RPNs associados a cada modo de falha, constrói-se um ranking a fim de identificar quais as falhas que terão uma influência mais negativa no desempenho do sistema, que serão, como tal, aquelas que terão maior grau de urgência de tomada de medidas corretivas ou preventivas.

Seguidamente, é necessário fazer uma identificação de ações que diminuam a ocorrência e a severidade de cada um dos modos de falha, dando prioridade aos que tiverem um valor de RPN superior. Adicionalmente, devem ser melhorados os métodos de controlo e detecção dos modos de falha. Deverão também ser definidos prazos e responsáveis para a implementação destas ações, assim como ações de monitorização do andamento das ações.

Por fim, deverá ser feita uma análise dos progressos conseguidos com a implementação das ações tomadas e um balanço para se saber o alcance das mesmas. Os índices de severidade, ocorrência e detecção serão recalculados, assim como os valores dos RPNs. Tendo em conta os valores atualizados destes parâmetros, decidir-se-á se o estudo FMEA e FMECA deve ser continuado e se devem ser implementadas novas medidas, ou se os resultados são satisfatórios para manter as medidas tomadas. Assim que todas estas etapas sejam ultrapassadas, deve-se atualizar o relatório FMEA/FMECA, com todos os novos dados relativos aos modos de falha.

3.3 *Reliability Centred Maintenance (RCM)*

A análise de *Reliability Centred Maintenance* (RCM) foi inicialmente criada com o intuito de servir a indústria aeronáutica. Atualmente esta técnica é usada em manutenção no setor dos transportes e em várias outras indústrias.

Esta técnica é feita em simultâneo com o preenchimento de uma tabela FMEA/FMECA e baseia-se numa conjugação da análise dos dados relativos aos componentes com a análise dos dados relativos à operação, ou seja, uma análise das condições a que estes estão sujeitos. O tratamento destes dados é, segundo Moubray (1997), uma espécie de aplicação formal de senso comum que visa assegurar que os ativos de uma certa entidade continuam a realizar as tarefas exigidas pelos seus consumidores. Além disso, o RCM também tem como objetivo a determinação dos processos de manutenção necessários para garantir que os equipamentos mantêm a performance esperada.

Para tal, o RCM assenta em quatro princípios básicos:

- Análise orientada e estruturada para preservar as funções do sistema;
- Estudo das debilidades do sistema;

- Definição de uma ordem de prioridade de correção dos modos de falha com base na sua importância;
- Para cada um dos modos de falha mais relevantes, o RCM define a efetividade e viabilidade de cada tarefa de manutenção e seleciona a mais eficiente.

3.3.1 Passos para a implementação do RCM

Este processo desenvolve-se através de uma abordagem passo a passo baseada em princípios simples que são aplicados universalmente. Deste modo, para fazer a análise RCM é necessário responder a sete perguntas básicas sobre o sistema:

1. Funções e performance requerida: Quais as funções e níveis de desempenho associados a cada ativo no seu contexto de operação?
2. Falhas funcionais: De que maneira é que cada ativo pode falhar pondo em causa o cumprimento das suas funções?
3. Modos de falha: O que causa cada falha funcional?
4. Efeitos de falha: O que pode acontecer cada vez que cada uma destas falhas ocorre?
5. Consequências da falha: Qual a relevância de cada uma das falhas?
6. Ações proativas e intervalos entre ações: O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
7. Ações padrão: O que deverá ser feito caso seja impossível de prever ou prevenir a falha?

O processo de responder a todas estas perguntas deverá ser registado numa tabela FMEA/FMECA, a qual deverá ser preenchida durante a aplicação do processo RCM.

3.3.2 Funções e performance requerida

A este grupo pertencem todas as funções primárias e secundárias e respetivos níveis de performance requeridos pelo consumidor.

As funções primárias entendem-se como os objetivos primários de cada um dos equipamentos. Geralmente as funções primárias respondem à pergunta: qual a finalidade do equipamento, sendo portanto, facilmente identificáveis.

Chamam-se de funções secundárias às condições segundo as quais os equipamentos têm que cumprir as suas funções primárias, ou seja, o cumprimento das normas ambientais, de segurança, de orçamento, de condições de controlo, de integridade estrutural e até mesmo a obtenção de um design apelativo.

Todas estas funções deverão ser colocadas na primeira coluna da tabela FMEA, tal como se pode verificar na tabela FMECA da APU que se apresenta no Anexo A.

3.3.2.1 Performance

Cada função deverá ser especificada ao pormenor, isto é, deve ser descrita a função e todos os níveis de desempenho esperados pelo consumidor, quer em termos qualitativos, quer em termos quantitativos. Deverão ser descritos para o pior caso possível (*worst case scenario*) e poderão ainda conter intervalos de valores de funcionamento. No caso em estudo, a função da APU é produzir e armazenar ar comprimido, livre de óleo e água (performance qualitativa), com pressões entre os 8.2 bar e os 10.2 bar com um caudal a rondar os 280 L/min (performance quantitativa).

No que toca à performance, esta poderá ser dividida em dois conceitos diferentes: a performance desejada e a capacidade projetada. A capacidade projetada deverá ser sempre superior à performance desejada pelo consumidor de modo a permitir que haja uma margem de degradação do equipamento sem que este deixe de desempenhar as suas funções nos moldes estabelecidos, tal como se pode verificar na figura 3.5.

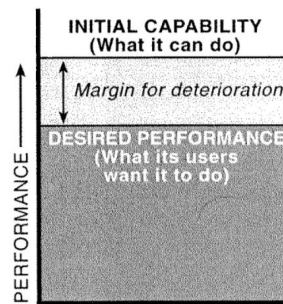


Figura 3.5: Margem de degradação (Moubray, 1997).

Dado que a manutenção nunca poderá melhorar as capacidades projetadas originalmente para um equipamento, o objetivo da manutenção passa por aproximar o equipamento ao máximo desses valores de capacidade iniciais, os quais serão os valores máximos de restauro possíveis de atingir. Por outro lado, a manutenção terá sempre de garantir que a performance de um equipamento cumpre com as especificações requeridas pelo consumidor.

Assim, a manutenção irá garantir que a performance de um equipamento se encontra sempre na zona da margem de degradação tal como se pode verificar pela figura 3.6.

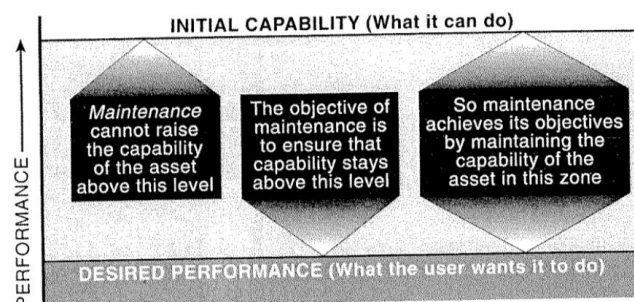


Figura 3.6: Intervalo da manutenção (Moubray, 1997).

3.3.2.2 Contexto de operação

O mesmo equipamento terá sempre desempenhos diferentes consoante o contexto de operação. Além disso, o grau de degradação e os modos de falha poderão ser muito distintos para diferentes operações. Desta maneira, o estudo do contexto de operação é de importância primordial antes de uma análise RCM.

Durante o processo de definição do contexto de operação, deverão ser tidas em conta as medidas de segurança, as normas ambientais, o nível de qualidade exigido pelo consumidor, as redundâncias presentes e o fluxo ou frequência dos processos.

Mais ainda, terão de ser consideradas as condições às quais os equipamentos estão sujeitos, ou seja, as condições ambientais (temperatura, pressão, humidade, abrasividade e corrosão da atmosfera envolvente), as condições do terreno (constituição do terreno, inclinação, grau de conservação do local/via de operação), condições de operação (velocidade, carga aplicada, mudanças bruscas de velocidade/direção) e o fator humano (capacidades do operador, correta utilização dos equipamentos).

3.3.3 Falhas funcionais

Chama-se falha funcional à falha de uma parte de um equipamento que poderá provocar ou não uma avaria no mesmo. Estas falhas poderão ser totais ou parciais.

Dá-se o nome de falha total à perda completa de uma função requerida por um equipamento. Por exemplo, no sistema em estudo, uma falha total do compressor seria a incapacidade deste para comprimir ar.

Uma falha parcial dá-se quando um componente consegue desempenhar a sua função primária, no entanto não a consegue manter dentro dos parâmetros requeridos para essa função. Aplicando ao caso em estudo, um exemplo de uma falha parcial do compressor seria caso este fosse capaz de comprimir ar mas não conseguisse comprimi-lo a uma pressão superior a 8.2 bar.

Assim, quando ocorre uma falha funcional o equipamento passa a ter um nível de desempenho inferior ao esperado, tal como está demonstrado no gráfico da figura 3.7.

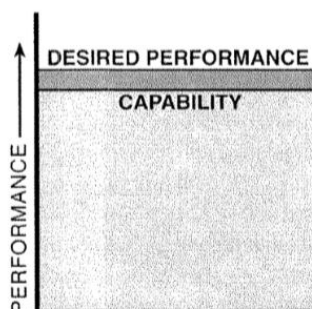


Figura 3.7: Desempenho nas falhas funcionais (Moubray, 1997).

Um ponto que também é de extrema relevância é uma definição clara e consensual entre todas as partes intervenientes do que é uma falha funcional. Um bom cumprimento deste ponto poupará muito tempo e não deixará margem para dúvidas se se está ou não perante uma falha.

Quanto ao preenchimento da tabela FMEA, deverão colocar-se as falhas funcionais na segunda coluna a contar da esquerda, tal como se pode verificar na tabela FMECA presente no Anexo A.

3.3.4 Modos de falha

Chama-se de modo de falha a todos os eventos que poderão causar uma falha funcional. É necessário frisar que nem todos os modos de falha causam falhas funcionais no sistema, uma vez que podem ser falhas ocultas, conceito este que será tratado mais à frente na subsecção 3.3.5.1.

A fim de estabelecer uma correta conexão entre os modos de falha e as possíveis causas geradoras é importante que sejam listadas as falhas funcionais na primeira coluna da tabela FMEA e só depois é que devem ser listados os modos de falha associados.

Quanto à descrição do modo de falha, deverá ser feita com um verbo precedido de um nome. Deverá ser o mais assertivo e detalhado possível. No caso de haver contactos ou válvulas, deverá ser indicado se o modo de falha acontece com este aberto ou fechado (geralmente existe um modo de falha para a válvula aberta e outro para a válvula fechada).

3.3.4.1 Importância do estudo dos modos de falha

Para cada componente podem haver dezenas de modos de falha diferentes. Como um sistema pode ser constituído por vários componentes, poderão haver centenas de modos de falha, fazendo com que num ativo de uma empresa haja milhares de falhas. Assim, o estudo dos modos de falha tem uma grande importância na identificação dos elementos causadores das falhas e, como tal, é primordial na gestão da manutenção. Deverão ser identificados apenas os modos de falha que são razoavelmente prováveis de se suceder.

Assim que todos os modos de falhas estejam identificados, poderá ser feita uma projeção das consequências adjacentes a cada modo de falha e decidir o que deverá ser feito para antecipar, prevenir, detetar ou corrigir cada uma delas.

Apenas em casos extremos poderá ser feita uma reestruturação do equipamento, opção esta que não é aconselhada por poder vir a introduzir novos modos de falha no sistema.

3.3.4.2 Tipos de modos de falha

No que toca aos modos de falha, estes poderão ser de 3 tipos diferentes dependendo do seu nível de performance atingido após manutenção:

- Descida dos níveis de performance iniciais;
- Subida dos níveis de performance iniciais;
- Incapacidade inicial.

O primeiro caso é aquele que é mais provável de ocorrer e dá-se geralmente devido à normal utilização do equipamento. Pode ocorrer por deterioração devido a fadiga, corrosão, abrasão, erosão ou degradação do isolamento. Pode também surgir devido a falhas na lubrificação, quer por falta ou excesso desta, pela escolha de lubrificantes inadequados, má aplicação destes, fugas ou até mesmo pela contaminação que vai ocorrendo no mesmo.

Quanto ao segundo caso, também é possível que ocorra uma subida no desempenho dos equipamentos face ao desempenho inicial destes. No entanto, esta subida não deverá ser vista como uma melhoria, uma vez que quase sempre está associado a um modo de falha oculta. Esta subida na performance pode ocorrer de uma má utilização por parte do operador que pode aumentar exponencialmente o desgaste da máquina e geralmente viola as normas de segurança estabelecidas para o equipamento.

Por último, existem modos de falha que vêm de uma má conceção do equipamento, que podem impedir o equipamento de desempenhar as suas funções corretamente desde o início. Estes poderão ser corrigidos através de uma reestruturação do equipamento.

3.3.4.3 Rigor do detalhe

No que toca ao rigor do detalhe, tanto pode ir desde um nível macro até uma escala molecular, dependendo do processo que está em análise, a partir do qual terá de ser estabelecida uma política de gestão de falhas adequada.

Apenas deverá ser listado cada modo de falha que seja razoavelmente provável de ocorrer no contexto de operação em questão. Para tal, geralmente recorre-se ao histórico de avarias do sistema, lista de modos de falha de sistemas análogos ao analisado e lista de modos de falha que estão associados aos planos de manutenção implementados.

Os modos de falha que são pouco prováveis de ocorrer, mas cujas consequências possíveis são muito severas deverão também ser listados, uma vez que, tal como se constatou na secção 3.2.2, o RPN destes modos de falha será alto.

3.3.5 Consequências das falhas

No que toca às consequências das falhas, estas podem dividir-se em falhas ocultas e falhas evidentes.

As falhas evidentes são aquelas que quando ocorrem durante o período de normal operação são evidentes para a tripulação. Muitas das vezes, geram a perda de uma função primária do sistema (falhas operacionais).

Por outro lado, uma falha oculta é aquela cuja ocorrência durante a normal operação não se torna evidente para a tripulação. Normalmente este tipo de falhas apenas é evidenciada em caso de falha múltipla, ou seja, quando se dá a falha de um outro equipamento que possa evidenciar a falha oculta.

3.3.5.1 Falhas ocultas

As falhas ocultas geralmente estão associadas a equipamentos de proteção ou redundâncias que não são à prova de falhas.

Os tipos de equipamentos em que é habitual ocorrerem falha ocultas é em alarmes que são acionados caso um equipamento esteja em falha. No sistema em estudo a válvula de pressão mínima (LPS) é um excelente exemplo disso, pois é um equipamento cuja falha não é detetada durante a operação normal da APU, por ser um equipamento que é acionado em caso de falha funcional do sistema (quando a pressão no sistema é inferior a 7 bar). Esta falha apenas pode ser evidenciada caso a APU apresente uma pressão inferior a 7 bar e a válvula LPS não seja acionada, ou seja, quando se dá uma falha múltipla.

Posto isto, existem cinco tipos de funções protetivas que podem gerar modos de falha ocultos:

- Alertar o operador da ocorrência de situações de operação anormais (a válvula LPS é um exemplo disso);
- Desligar um equipamento quando ocorre uma falha que possa danificar este (fusíveis);
- Eliminar ou suavizar condições anormais que precedem uma falha e que poderão causar danos sérios;
- Ultrapassar uma função que tenha falhado;
- Prevenir o surgimento de situações perigosas.

Como as falhas ocultas apenas se manifestam em caso da ocorrência de uma falha múltipla associada a essa falha oculta, então o seu plano de manutenção terá o seu foco em diminuir a probabilidade de ocorrência de falha múltipla, a qual pode ser calculada através da equação 3.2:

$$P_{FM} = P_{FP} * M_I \quad (3.2)$$

Em que P_{FP} é a probabilidade da ocorrência de uma falha da função de proteção, M_I é a média da indisponibilidade dos dispositivos protetores e P_{FM} é a probabilidade de ocorrência da falha múltipla.

Assim, poderão ser tomadas medidas proativas de manutenção caso estas sejam economicamente rentáveis e reduzam a probabilidade de falhas múltiplas até um nível tolerável (definido pelo projetista).

3.3.5.2 Segurança e consequências ambientais

Tal como foi estudado na secção 3.2.2, os modos de falha com consequências ambientais ou relativas à segurança são aqueles que apresentam os valores mais altos de severidade na tabela FMECA.

Segundo a metodologia RCM, estes modos de falha serão aqueles cujas medidas de prevenção e métodos preditivos de falha serão os mais conservativos, independentemente do número de

ocorrências que esta possa ter. Usualmente são tomadas medidas proativas de manutenção para impedirem ou minimizarem os efeitos da falha. Existem também várias normas com medidas que devem ser tomadas para prevenir estas falhas.

3.3.5.3 Consequências operacionais

As consequências operacionais são todas aquelas que incapacitam o ativo de realizar alguma das suas funções principais, ou secundárias durante o processo de operação.

Para este tipo de modos de falha não existem normas que obrigam a tomar medidas preventivas para reduzir o risco de ocorrência de falha. Assim, as medidas proativas de manutenção poderão ser tomadas mediante a vantagem económica que estas irão oferecer. Por outras palavras, as medidas proativas de manutenção deverão ser tomadas caso o custo da implementação dessas tarefas proativas seja inferior ao somatório do custo das consequências operacionais com o custo da reparação da falha em questão.

3.3.6 Ações preventivas

As ações preventivas são todas as tarefas efetuadas antes da ocorrência de uma falha e que visam a impedir (diminuir a probabilidade) de um componente de entrar em modo de falha. Além disso, existem muitas tarefas preventivas com o intuito de identificar defeitos que poderão levar à ocorrência de uma falha.

Existem dois pontos predominantes na seleção de uma ação preventiva:

- Relação entre a probabilidade de falha de um componente e a sua idade;
- Consequências da ocorrência de uma falha.

Tal como foi visto no capítulo 3.1.2 através da figura 3.4, existem 6 tipos de curvas de probabilidade de ocorrência de uma falha em função do tempo de operação. É através destas que deverá ser feito um plano de manutenção preventiva associado a cada componente. É de destacar o facto de que apenas os componentes que apresentem uma degradação associada ao tempo de utilização deverão sofrer manutenções preventivas, ou seja, os componentes com curvas de probabilidade de falha iguais às curvas 1 e 2 da figura 3.4. Em alguns casos, poderão também ser aplicados planos de manutenção preventiva a equipamentos com uma curva de probabilidade de falhas igual à do gráfico 3 da figura 3.4.

Posto isto, poderão ser agendadas restaurações ou descartes, dependendo do componente. Este tipo de manutenção será aplicado a um certo componente depois de decorrido um determinado limite de tempo de operação, independentemente da condição do componente.

Assim, as ações de prevenção serão fiáveis quando são aplicadas a componentes em que:

- É possível identificar uma idade a partir da qual o componente apresenta um rápido aumento na probabilidade de ocorrência de falha;

- A maior parte dos componentes desempenha as suas funções corretamente até essa mesma idade (no caso de modos de falha que apresentem consequências ambientais ou na segurança terão de ser 100 % dos componentes a atingir essa idade).

Será portanto, necessário definir a altura em que deve ser feita a substituição ou reparação programada de cada componente. Para tal, existem 3 maneiras alternativas para identificar essa idade:

- Seguir o plano de manutenção sugerido no manual do fabricante;
- *Educated Guessing*;
- *Wait and See* (WaS).

3.3.6.1 Seguir o plano de manutenção sugerido no manual do fabricante

Esta opção apresenta vários inconvenientes. Hoje em dia os fabricantes de veículos ferroviários são integradores de sistemas, isto é, fabricam veículos com peças de diferentes fabricantes. Assim, geralmente o manual do fabricante tende a ser uma compilação dos diferentes manuais das peças que integram o veículo. Deste modo, o plano de manutenção não é feito para o comboio como um todo, mas sim para cada componente isoladamente, o que é, segundo Freitas (2019), uma abordagem errada pois os componentes apresentarão mais ou menos desgaste dependendo das solicitações a que são submetidos, e isso depende do meio em que são envolvidos. Além disso, os componentes apresentarão alturas muito diferentes uns dos outros para fazer as manutenções agendadas.

Adicionalmente, o manual do fabricante apenas diz respeito ao material circulante, não fazendo a interceção com o contexto de operação do veículo. Poderá ser uma má opção, uma vez que para diferentes contextos de operação o mesmo veículo terá comportamentos diferentes e deverá, como tal, seguir um plano de manutenção diferente.

3.3.6.2 *Educated Guessing*

Este método junta todo o conhecimento de um grupo de análise constituído por pessoas que conheçam bem o sistema e as operações.

Assim, é feita uma análise com base na informação contida no manual do fabricante, na operação e no conhecimento das consequências reais que podem advir de cada falha. A partir desta análise será programada a melhor altura para fazer cada manutenção agendada.

3.3.6.3 *Wait and See* (WaS)

Esta abordagem é um processo experimental que, tal como o nome indica, se baseia em esperar até que um componente entre em falha, e posteriormente registar o tempo que este demorou a falhar. Aplicando este método a vários componentes do mesmo tipo descobre-se a altura em que a probabilidade do componente entrar em falha aumenta rapidamente.

Para a aplicação deste método é de extrema importância que se cumpram duas premissas:

- É necessário ter a certeza de que modo de falha está relacionado com a idade do componente;
- As consequências associadas ao modo de falha terão de ser toleráveis para a organização.

3.3.7 Ações preditivas

Tal como foi visto anteriormente, nem todos os componentes apresentam uma relação entre o tempo de operação e a probabilidade de ocorrência de uma falha. Contudo, grande parte dos componentes de um sistema apresentam comportamentos que podem indiciar a proximidade de uma avaria. Para estes, é possível prever as avarias e tomar medidas para evitar que estas ocorram ou, caso tal não seja possível, evitar ou diminuir os seus efeitos.

Assim, este método assume que uma potencial falha é atingida quando se está perante uma certa condição que indica que uma falha funcional está a ocorrer, ou prestes a ocorrer, isto é, quando se está perante um ponto P como se pode ver no gráfico da figura 3.8.

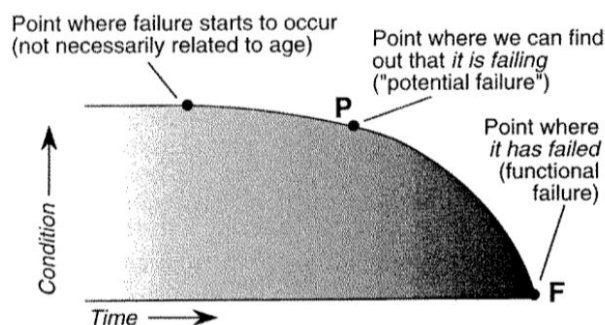


Figura 3.8: Curva P-F (Moubray, 1997).

Este tipo de manutenção, tal como foi referido na secção 3.1.3, é baseado na condição dos componentes e, como tal, visa a procura de pontos P, para que possam ser tomadas ações antes de ser atingida a falha funcional (ponto F).

O intervalo P-F tende a ser consistente todavia, este poderá flutuar entre uma certa gama de valores, tal como se pode constatar na figura 3.9.

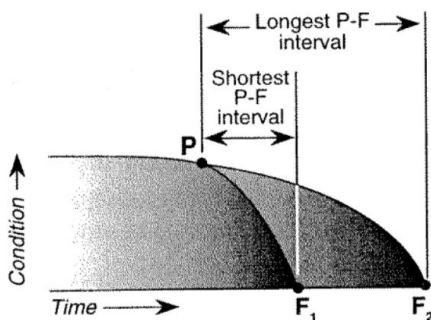


Figura 3.9: Intervalos P-F inconsistentes (Moubray, 1997).

Neste caso, deverão ser tomadas ações entre o intervalo P-F mais curto (antes do ponto F1) a fim de evitar a ocorrência de uma avaria.

Será sempre desejável que os intervalos P-F sejam o mais longos possíveis pois geralmente o ponto P não é detetado imediatamente após a sua ocorrência. Além disso, intervalos P-F maiores permitem uma maior probabilidade de agir a tempo de prevenir a falha e permitem que não seja necessário fazer tantas inspeções para verificar as condições do equipamento.

Caso o intervalo P-F seja extremamente inconsistente, não será possível aplicar uma ação de manutenção baseada na condição para esse componente.

3.3.7.1 Fiabilidade das tarefas de manutenção baseada na condição

Por vezes são feitas inspeções periódicas para se verificar as condições dos equipamentos a fim de identificar possíveis pontos P que indiquem a proximidade de uma avaria.

Porém, estas inspeções só podem ser fiáveis se:

- É possível definir uma condição de potencial falha (ponto P);
- O intervalo P-F tende a ser razoavelmente consistente;
- É possível e economicamente fiável monitorizar o equipamento em intervalos mais curtos do que o intervalo P-F;
- O intervalo P-F é suficientemente longo para que seja tomada uma ação que reduza ou elimine as consequências da falha funcional.

Caso todas estas condições sejam cumpridas, poderá ser implementado um plano de inspeções periódicas a fim de verificar as condições do equipamento. Como o tempo de vida útil de um equipamento é, geralmente, muito superior ao tempo do intervalo P-F (caso contrário não seria fiável fazer inspeções periódicas em busca de pontos P), então é normal o gráfico das inspeções periódicas ser do género do gráfico da figura 3.10, no qual consta a curva P-F de uns rolamentos.

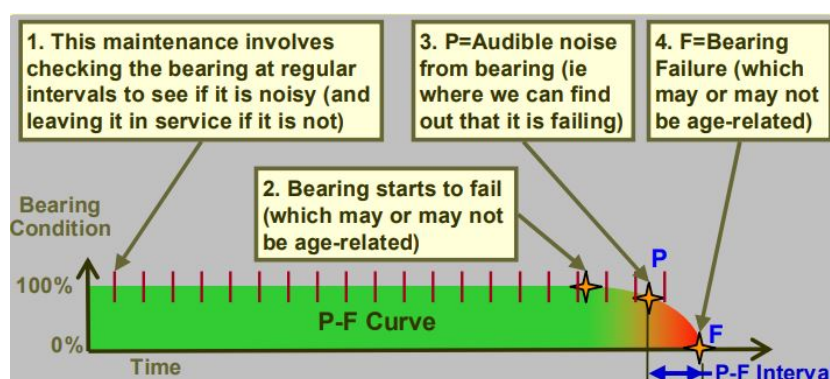


Figura 3.10: Inspeções periódicas para detetar pontos P (Mutual Consultants, 2010).

3.3.7.2 Categorias das técnicas de manutenção baseada na condição

Existem quatro maneiras principais de monitorizar as condições de um equipamento:

- Monitorização da condição do equipamento, usando sensores especializados para medir certos parâmetros (pode ser muito vantajoso na deteção de falhas ocultas);
- Variações na qualidade do produto final (isto no caso de se estar a monitorizar um equipamento que manufacture um produto);
- Monitorização da performance das funções primárias do equipamento (monitorização do processo);
- Técnicas de inspeção baseadas nos sentidos humanos (extremamente barato se a monitorização for feita por pessoas que trabalham diretamente com os equipamentos).

No entanto, nenhuma destas é melhor que as outras, tudo dependerá da situação e dos equipamentos em questão.

Por outro lado, na maioria das vezes um modo de falha pode ser detetado através da monitorização de várias variáveis diferentes, que levam à descoberta de um ponto P diferente, com um intervalo P-F diferente. O gráfico da figura 3.11 mostra a deteção de diferentes pontos P associados à monitorização de uma diferente variável na monitorização de um eixo de fuso de esferas.

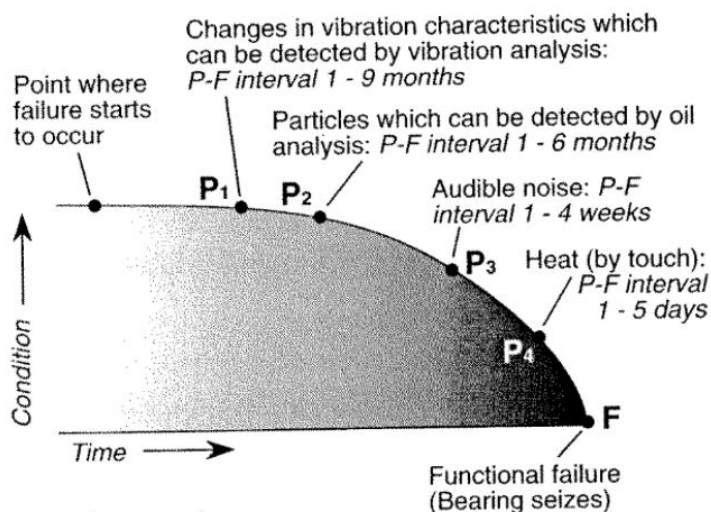


Figura 3.11: Descoberta de diferentes pontos P com a monitorização de diferentes variáveis (Moubray, 1997).

Quanto aos métodos de obtenção do intervalo P-F, estes usualmente são experimentais e podem ser equiparados aos métodos de obtenção do intervalo de descarte/revisão periódica de componentes estudados no capítulo 3.3.6.

3.3.7.3 Razões para implementar um método de manutenção preditiva

Tal como acontece com a manutenção preventiva, a implementação de um plano de manutenção preditiva pode-se revelar interessante caso este seja economicamente fiável.

Assim, a manutenção com base na condição pode-se revelar vantajosa ao nível da deteção de:

- Falhas ocultas - se reduzir o risco de falha múltipla até um nível tolerável;
- Falhas com consequências ambientais ou na segurança - caso seja fiável que o aviso (ponto P) é detetável a tempo de poder serem tomadas ações que possam evitar a ocorrência da falha funcional, ou de evitar os danos desta;
- Falhas com consequências operacionais - se o custo da ação de deteção da falha baseada na condição for inferior ao somatório dos custos de reparação da falha com o custo das consequências operacionais;
- Falhas com consequências não operacionais - se o custo de deteção e reparação da falha potencial for inferior ao custo de reparação da falha funcional.

3.3.8 Importância do *Data Mining* no RCM

O avanço tecnológico na indústria tem seguido no sentido de monitorizar cada vez mais a atividade das máquinas. Esta monitorização de equipamentos tem-se revelado um recurso extremamente valioso no aumento da produtividade de sistemas, fornecendo uma vantagem competitiva significativa. Como tal, as máquinas mais recentes apresentam cada vez mais sensores e transdutores ligados a sistemas de aquisição de dados criando uma gigantesca quantidade de dados.

De modo a analisar esta quantidade grotesca de informação, o *data mining* surgiu como uma forma de extrair conhecimento útil a partir da análise destes dados. Este método tem como finalidade modelar o comportamento de sistemas com precisão, aplicando modelos matemáticos para descobrir automaticamente padrões nos dados da atividade de certos equipamentos. No princípio, este procedimento era aplicado apenas com o objetivo de aumentar a produtividade, no entanto, rapidamente se descobriu que a análise dos dados de produção tem um alcance muito superior ao que se pensava inicialmente.

Esta metodologia revela-se extremamente eficaz na definição do estado dos equipamentos. Como tal, hoje em dia, o *data mining* é indispensável ao RCM. A sensorização de equipamentos e a análise dos dados que surgem da normal atividade dos sistemas em que estes se inserem tem-se mostrado extremamente assertiva na definição dos padrões normais de funcionamento de sistemas. Assim, através do estudo do comportamento de algumas variáveis de um sistema é possível fazer um rápido diagnóstico deste.

Como tal, o *FailStopper* surge com o objetivo de criar códigos de inteligência artificial que sejam capazes de detetar patamares de alerta para situações fora do normal que possam indicar a aproximação da ocorrência de uma avaria na unidade de produção do ar comprimido dos Eurotram. Para tal, pretende-se que a partir da monitorização de múltiplas variáveis da APU seja possível

criar algoritmos inteligentes que aprendam a partir dos dados históricos quais são as condições que levam à ocorrência de uma avaria, de modo a criar regras de definição de quando é que deve ser dado o alerta para uma potencial avaria.

Capítulo 4

Principais falhas da APU e métodos de deteção das mesma

Com a finalidade de se perceber quais as avarias mais frequentes da APU, foram analisadas todas as avarias pneumáticas ocorridas nos veículos nos últimos 3 anos, assim como todas as fichas técnicas dos componentes que constituem a APU. Com estes dados fez-se uma análise FMEA - *Failure Mode Effects Analysis* e posteriormente averiguou-se a criticidade de cada um dos parâmetros, de modo a construir a tabela FMECA - *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* que se encontra no Anexo A. Em simultâneo com o preenchimento da tabela FMECA foi seguido o métodos de análise RCM abordado na secção 3.3 de modo a descobrir todos os modos de falha passíveis de ocorrer e averiguar as suas causas, a sua probabilidade de ocorrência, a sua severidade e o grau de deteção da ocorrência do modo de falha. Atribuíram-se valores de 1 a 10 a cada um destes índices de acordo com a norma BS EN 50155:2017 e através destes calculou-se o índice RPN (*Risk Priority Number*) para se fazer um ranking das falhas mais preocupantes (Moubray, 1997).

Através desta análise foi também possível descobrir os pontos e componentes mais frágeis do sistema, o que ajudou posteriormente a inferir quais as variáveis fulcrais a serem medidas para monitorizar o comportamento da APU e poder prever eventuais avarias do sistema.

4.1 Eletroválvula de comando de drenagem A4

O componente mais problemático do sistema é a eletroválvula de comando da drenagem das torres de secagem e da drenagem do filtro separador ciclónico, isto é, a válvula A4. A carta eletrónica aciona esta válvula eletronicamente quando o pressostato de comando lê uma pressão no sistema inferior a 8.2 bar. Aí é enviado um impulso elétrico para que a válvula A4 efetue a ligação entre o canal com a entrada de pressão e a saída para as válvulas A5 (drenagem do filtro separador ciclónico) e a válvula A7 (drenagem total das torres secadoras do ar).

Caso a válvula falhe fechada, o não acionamento desta leva a um aumento da humidade do ar presente no sistema. Uma vez que a água retirada do ar não será drenada, haverá um aumento

da taxa de corrosão das condutas do sistema devido a condensação de água nas mesmas. Visto que este facto não leva a uma diminuição da pressão no sistema, então está-se perante uma falha oculta.

Por outro lado, o acionamento excessivo da válvula (válvula falha aberta) levará a uma perda de ar excessiva, o que leva a uma perda da pressão do ar no sistema e, caso esta baixe para um valor inferior a 7 bar, este será automaticamente considerado inoperável.

4.1.1 Modos de falha - Sub-dimensionamento

A eletroválvula A4 foi dimensionada para trabalhar em condições de pressão entre 0 e 10 bar. Visto que a pressão de funcionamento da APU está entre 8.2 e 10.2 bar, então durante o seu tempo de vida útil está sob pressões um pouco acima da sua pressão máxima de funcionamento. Assim, quando solicitada a 10.2 bar várias vezes, a válvula vai perdendo estanquidade entre os seus canais (figura 4.1), nomeadamente entre a entrada de pressão e a saída para as válvulas A5 e A7. Quando isto acontece, a eletroválvula atua como se estivesse ativada nas alturas em que devia estar desativada, o que leva ao acionamento das duas válvulas de drenagem, baixando a pressão de toda a APU. Este modo de falha produz efeitos imediatos na APU ao baixar-lhe a pressão e, dependendo do caudal de ar perdido, poderá levar a uma retirada imediata do veículo da via.

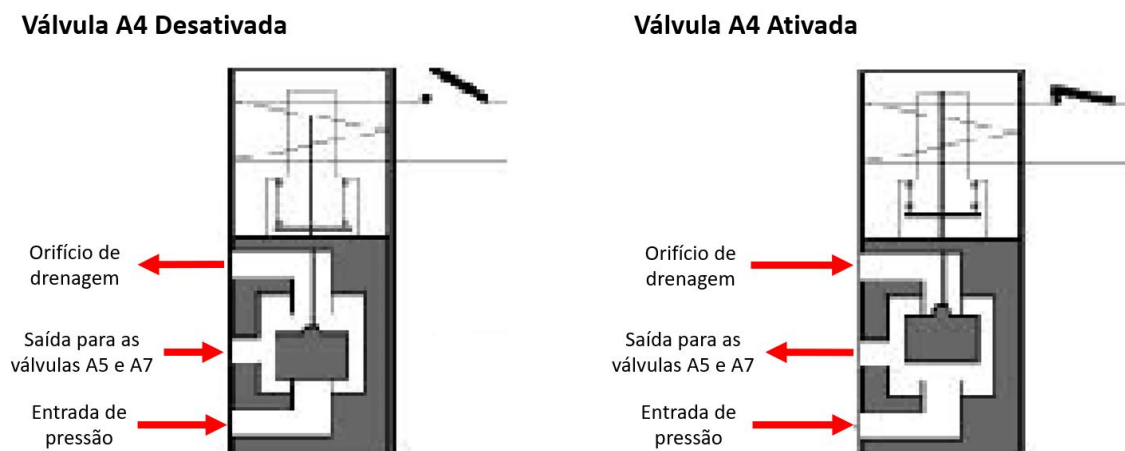


Figura 4.1: Válvula A4 ativada e desativada. Adaptado de NORGREN - Fluid Controls (n.d.).

4.1.2 Modos de falha - Entupimento dos canais da válvula

A eletroválvula em questão é de dimensão muito reduzida e os seus orifícios são de dimensão muito reduzida (9.6 mm) face aos restantes da APU (Afonso, 2016). Assim, por vezes o canal de entrada de pressão fica obstruído, o que impede o ar de passar na válvula, fazendo com que a eletroválvula A4 falhe fechada. Tal geralmente sucede-se quando há uma fuga de óleo do compressor para o resto do sistema, o que aumenta a probabilidade da ocorrência destes entupimentos.



Figura 4.2: Fotografia da válvula A4

A obstrução da passagem de ar desde a entrada de pressão para a válvula A4 leva a que esta não consiga pilotar as duas válvulas de drenagem. Como tal, não se darão estas duas descargas da água retirada ao ar, o que levará a um aumento da humidade do ar no sistema, o que levará a longo prazo à degradação dos componentes da APU por condensação da água nas condutas.

Excetuando o caso extremo de se dar o entupimento do filtro separador ciclónico, que impediria a passagem do ar para as torres secadoras e para o painel pneumático, este modo de falha não leva a uma diminuição da pressão do ar no sistema, sendo, como tal, uma falha oculta.

4.1.3 Modos de falha - Falha elétrica

Apesar de não ser muito comum, por vezes também ocorrem falhas elétricas com consequências na válvula A4. Assim, poderá ocorrer uma falha na carta eletrónica da APU, não havendo um impulso elétrico a excitar a eletroválvula A4. Por outro lado, esta poderá não chegar a detetar o impulso elétrico. No entanto, a falha elétrica mais ocorre quando os enrolamentos da bobina da eletroválvula A4 queimam.

Independentemente da causa da falha elétrica, este modo de falha leva a que a eletroválvula A4 falhe fechada, o que leva às consequências explicadas na sub-secção anterior (sub-secção 4.1.2).

4.1.4 Solução apresentada para detetar as falhas da eletroválvula A4

Por várias vezes nos últimos anos esta eletroválvula esteve para ser erradicada dos Eurotram e substituída por outra que se revelasse mais robusta. No entanto, todas as opções que surgiram no mercado em alternativa a esta eram eletroválvulas demasiado grandes, cuja introdução na APU iria obrigar a uma reestruturação do painel pneumático devido ao tamanho destas, alteração esta, que se iria revelar dispendiosa e possivelmente iria introduzir novos modos de falha inesperados no sistema, pelo que esta alteração impediu a substituição da eletroválvula supracitada.

Como tal, será necessário detetar se a eletroválvula A4 está a operar corretamente, portanto é necessário saber se esta está aberta quando está a passar um sinal elétrico pela mesma e se está fechada quando por ela não está a passar corrente.

Assim, o sistema de aquisição de dados vai ler o sinal elétrico que é enviado para a eletroválvula A4 para saber em que posição é que esta deverá estar. Além disso, será colocado um

transdutor de pressão no caminho 1 assinalado na figura 4.3 para verificar se a eletroválvula A4 está a pilotar as válvulas A7 e A5 nos momentos indicados. Em alternativa pensou-se em colocar um microswitch na eletroválvula A4 para verificar quando é que esta comutava, mas pelo tamanho reduzido da válvula e pelo grau de intrusão desse sensor no sistema não se optou por essa opção. Além disso, ponderou-se em colocar um transdutor de caudal em vez do transdutor de pressão, no entanto essa solução revelou-se consideravelmente mais cara.

Quanto ao local onde o transdutor de pressão será colocado, poderia ter-se escolhido o caminho 2 apresentado na figura 4.3, no entanto escolheu-se o caminho 1 pois esta conduta é muito mais comprida, apresentando mais espaço de manobra para a colocação do transdutor.

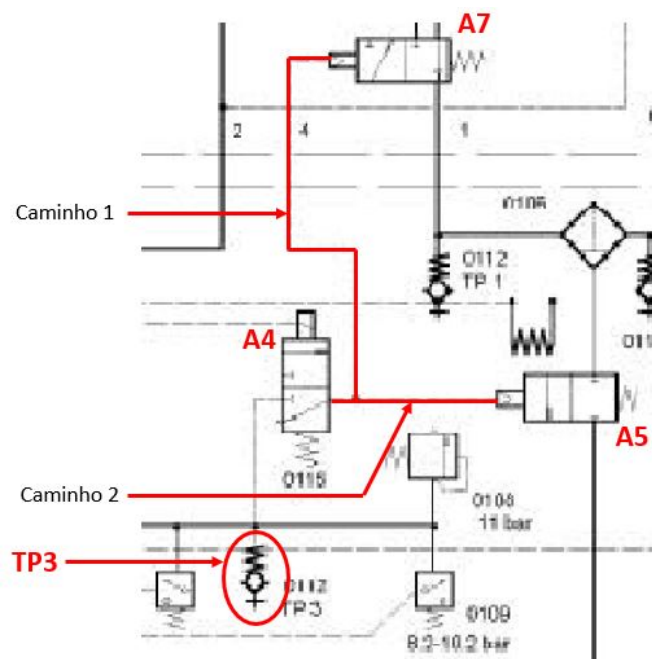


Figura 4.3: Sensores de monitorização da válvula A4. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

Além disso, colocou-se um transdutor de pressão no orifício de leitura de pressão TP3 (figura 4.3) que já existia no sistema, que irá ler a pressão no painel pneumático e verificar se não há nenhum problema antes da eletroválvula A4, uma vez que o ar comprimido que esta usa para pilotar estas duas outras válvulas vem do painel pneumático.

4.2 Válvula de descarga do filtro separador ciclónico (A5)

Apesar de não apresentar tantas avarias como a eletroválvula A4, na válvula A5 chegam a ser reportadas tantas avarias por ano como na anterior, uma vez que algumas das avarias que são reportadas na válvula A5 são causadas por falhas na A4 quando esta avaria de modo a acionar a válvula A5 continuamente.

No que toca às avarias realmente causadas pela válvula A5, geralmente estas ocorrem devido a uma falha na vedação do o'ring do meio. De modo a vedar as diferentes divisões presentes na válvula A5, esta possui 3 o'rings para separar:

- O exterior da drenagem;
- A drenagem da entrada de pressão (ar húmido vindo do filtro separador ciclónico);
- A entrada de pressão (ar húmido vindo do filtro separador ciclónico) da pilotagem.

A atividade do normal uso da válvula leva ao desgaste de todos estes o'rings, o que faz com que por vezes algum destes não consiga manter a estanquidade entre as duas divisões que separa. É o que costuma acontecer no o'ring do meio, que devido ao desgaste tende a soltar-se da sua posição normal. Isto leva à perda da estanquidade entre a divisão onde está o orifício de entrada de pressão e aquela onde se encontra o orifício que leva à drenagem da válvula. Como tal, o orifício de pressão (que tem ligação ao ar presente no filtro separador ciclónico) irá estar a drenar ar constantemente para o exterior através do orifício de drenagem. Com esta fuga, a pressão na APU irá baixar drasticamente e, caso o motor não consiga vencer a fuga, o sistema irá atingir uma pressão inferior a 7 bar, o que levará ao disparo do pressostato de alarme, conduzindo a uma saída de linha.

Assim, colocou-se um pressostato na saída da válvula A5 para verificar quando é que esta efetua a descarga. Uma vez que a atividade da eletroválvula A4 também está a ser monitorizada, será possível saber se caso a válvula A5 efetue descargas em alturas para as quais não fosse expectável que tal acontecesse, se a falha ocorreu na válvula A5 ou na A4.

Mais uma vez, optou-se por colocar um pressostato em vez de um medidor de caudal por ser uma solução consideravelmente mais barata.

4.3 Fugas de óleo

As fugas de óleo constituem os modos de falha ocultos mais recorrentes da APU. Tanto podem ocorrer para o exterior (pelo visor do nível do óleo, pelo radiador ou devido a um mau aperto das tubagens pelas quais o óleo passa) como também poderão ocorrer fugas de óleo do compressor para o resto da APU (por falhas a retirar o óleo do ar no filtro do óleo).

Em ambos os casos há consequências negativas para o compressor uma vez que este não é devidamente lubrificado, o que irá aumentar o atrito na rotação deste, podendo aumentar a probabilidade de gripar o compressor, além de exigir um esforço maior por parte do motor elétrico e de diminuir a refrigeração do ar e, como tal, a eficiência do processo de compressão. No caso de haver fugas de óleo para a APU, além destas consequências, o óleo que escapa para a APU irá deteriorar as condutas e diminuir a dificultar o processo de secagem do ar. Assim, propõe-se uma medição do nível do óleo do compressor e da temperatura deste fluido.

4.4 Fugas no sistema de ar comprimido a jusante da APU

Apesar destas não ocorrerem na APU, a sua deteção é feita na APU e, visto que o número destas avarias é 5 vezes superior ao número de avarias detetadas na APU, seria importante diferenciar as avarias ocorridas na APU das ocorridas a jusante da APU, mas com influência direta na APU. Além disso, considerou-se que seria muito vantajoso conseguir prever algumas das avarias ocorridas a jusante da APU.

Assim sendo, vai ser colocado um transdutor de caudal entre a APU e os reservatórios de ar e será também colocado um transdutor de caudal a ler a pressão do ar à saída dos reservatórios em cada uma das APUs a instrumentar. Com estes, e com a informação lida pelo transdutor de pressão presente no painel pneumático será possível monitorizar a quantidade de ar comprimido que está a ser consumido nos clientes do ar comprimido.

Uma vez que a quantidade de ar comprimido consumido nos clientes de ar comprimido em condições normais de operação é previsível dependendo da zona em que o comboio se encontra, da temperatura e da humidade a que está sujeito, então é possível inferir se o sistema apresenta uma fuga caso esse consumo de ar seja superior ao expectável para aquela zona nas condições de humidade e temperatura sentidas nesse instante. Assim, é possível prever essas fugas de ar através da análise desta informação juntamente com a análise da posição do comboio lida por um GPS e da temperatura e humidade atmosférica sentidas na zona em que o veículo se encontra.

4.5 Avarias relativas ao motor

Apesar de pouco frequentes, por vezes ocorrem avarias relacionadas com o motor. Estas tanto podem ocorrer pela queima dos enrolamentos da bobina do motor devido a um sobreaquecimento das mesmas, pelo facto do sistema não conseguir acionar o motor (por vezes o contactor que liga o motor encrava na posição que corresponde ao motor desligado e aí permanece até ser substituído) ou por um sobreaquecimento do óleo usado na lubrificação do compressor (pois quando este atinge uma temperatura de 100 °C o pressostato do óleo comunica à unidade de controlo eletrónico e esta desligará o motor).

Para prever estas avarias e monitorizar a atividade do motor será colocada um transdutor de pressão (equivalente a uma pinça amperimétrica) para ler a corrente que passa no motor. Esta apenas vai ler uma das 3 fases do motor e vai ler corrente entre 0 a 11.5 A, para tensões que chegam aos 380 V DC. Com este transdutor será possível monitorizar os gastos de corrente e os modos de funcionamento para o motor em carga e em vazio e fazer uma monitorização da atividade do compressor.

4.6 Avarias relativas aos pressostatos

Tanto o pressostato de comando como o pressostato de alarme apresentam avarias de incorreta leitura da pressão. O pressostato de alarme chega a detetar erroneamente várias vezes por ano

pressões abaixo dos 7 bar, comunicando esta informação à unidade de controlo eletrónico do veículo, o que leva a uma remoção deste de operação, quando o veículo não apresenta nenhuma avaria.

Assim, será colocado um transdutor de pressão num orifício de leitura de pressão próprio para tal (TP3) que existe no painel pneumático do veículo. Além deste transdutor permitir detetar avarias nos pressostatos presentes na APU, também será vital para todo o processo de monitorização da APU.

Adicionalmente colocar-se-à um transdutor de pressão no orifício de leitura de pressão presente no compressor (TP2) para que possa ser comparada a pressão que este está a gerar com aquela que é conseguida a jusante do compressor.

4.7 Avarias nas torres de secagem

É nas torres de secagem que residem muitas das falhas ocultas do sistema. Uma vez que grande parte dos modos de falha destas afetam a humidade do ar, mas não diminuem a sua pressão, então é necessário fazer um controlo da humidade deste.

Assim, inicialmente ponderou-se instalar um transdutor de humidade entre a APU e os reservatórios de ar, no entanto, tal como se constatará no capítulo 5, este transdutor teria alguns inconvenientes, pelo que será colocado um transdutor de pressão na conduta por onde é feita a descarga das torres de secagem para monitorizar a atividade destas. Pensou-se em alternativa em colocar detetores microswitch em cada uma das válvulas que controlam as torres de secagem, mas esta ideia não seria exequível uma vez que o espaço no interior da base das torres de secagem é muito pequeno, além de que introduzir sensores neste local seria demasiado intrusivo para o sistema.

Capítulo 5

Sensorização

No capítulo 4 foram apresentados os principais modos de falha da APU e uma proposta de sensorização para prever a ocorrência de algumas das avarias mais comuns desta unidade. Assim, neste capítulo será feita uma especificação para esta sensorização e serão apresentados os detetores e transdutores que foram escolhidos para realizar cada uma das medições.

Visto o *FailStopper* tratar-se de um projeto piloto, além dos sinais de detetores e transdutores a implementar, o sistema de aquisição de dados irá também guardar e enviar para a *cloud* as informações relativas à carta eletrónica da APU para aferir se as falhas que surgem ocorreram nos componentes e não de problemas oriundos da carta eletrónica. Além disso, estes servirão para comparar a atividade da carta eletrónica com os efeitos que esta provoca na APU. Esta análise será feita através da comparação dos *outputs* da APU com os *inputs* da carta eletrónica.

Na figura 5.1 está representado o esquema da APU e a localização de alguns dos sensores que constavam no plano inicial de manutenção preditiva criado para monitorizar a atividade da APU.

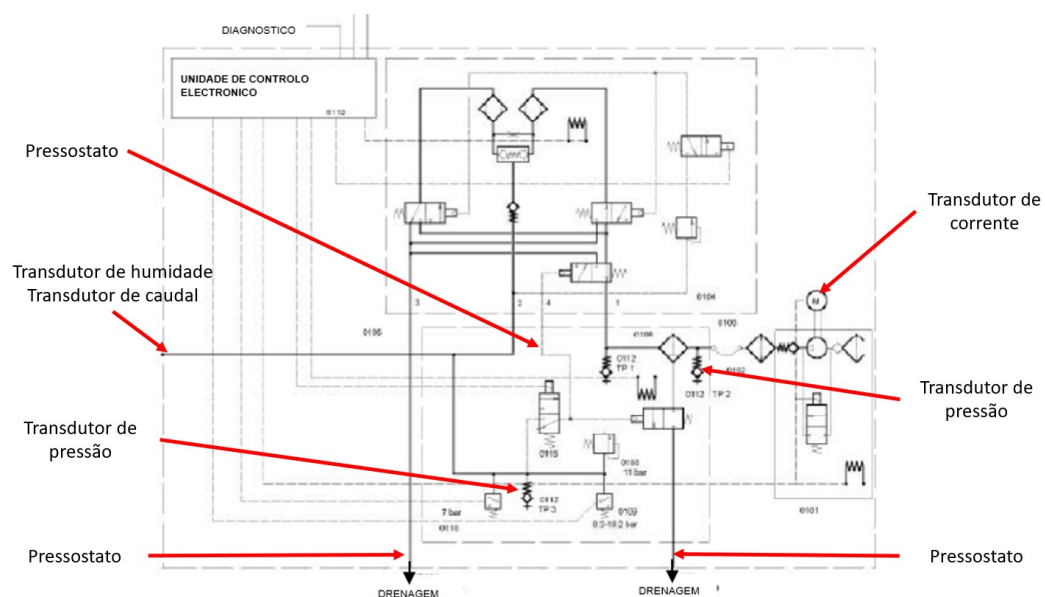


Figura 5.1: Distribuição dos transdutores e detetores a montar na APU que constavam no plano inicial de manutenção preditiva. Adaptado de Metro do Porto S.A. (2002b).

Além destes ainda constava neste plano a implementação de um transdutor para monitorizar a quantidade de óleo, um transdutor da temperatura do óleo, um GPS e todos os sinais elétricos retirados da carta eletrónica.

Pensou-se também colocar um transdutor de temperatura e um de humidade atmosférica na APU para interligar a atividade do veículo com as condições de operação. No entanto, como se constatará no capítulo 6, o sistema de aquisição de dados escolhido possui um GPS incorporado. Como tal, a humidade e temperatura serão tratadas a partir das humidades e temperaturas em tempo real lidas em locais próximos do local onde o veículo estará a passar, tal como se constatará na secção 6.3.

5.1 Sistema de aquisição de dados e implicações que este terá na sensorização

A escolha dos detetores e transdutores foi feita em paralelo com a escolha do sistema de aquisição de dados. Inicialmente foi feita uma especificação de sensorização que se destinava a cobrir as principais falhas da APU e que pode ser lida com mais detalhe na secção 5.2. Esta especificação inicial foi enviada a vários fornecedores nacionais e internacionais com o intuito de se pedir um orçamento para o projeto "chave na mão" para aquisição dos detetores, transdutores, sistema de aquisição de dados, módulos de comunicação e montagem.

Posteriormente receberam-se vários orçamentos com uma ordem de grandeza muito superior ao orçamento estipulado para o projeto (quase 5 vezes superior aos 10 000 € orçamentados para esta parte do projeto), o que permitiu concluir que comprar os instrumentos de medição a um fornecedor e adquirir o sistema de aquisição de dados com os protocolos de comunicação para enviar a informação para a *cloud* a outro poderia revelar-se uma solução mais económica, pelo que se optou por essa estratégia.

Ao longo do processo de consulta de vários fornecedores de sistemas de aquisição e envio de dados capazes de trabalhar em ambiente ferroviário, concluiu-se que o *MB1000* da *Nomad Tech* apresentava-se como a melhor opção a adquirir uma vez que o preço apresentado por estes era muito inferior a todos os outros orçamentos de equipamentos equivalentes recebidos. Além disso, este equipamento apresentava 8 entradas analógicas e 8 entradas digitais, o que era suficiente para cobrir o número de sinais a ler definidos no plano inicial.

No que toca à natureza dos sinais a ler, as entradas analógicas do dispositivo da *Nomad Tech* proporcionavam a possibilidade de ler sinais em corrente (de 0 – 20 mA ou de 4 – 20 mA) ou em tensão (de 0 – 10 V DC ou de 0 – 24 V DC), sendo que se optou pela opção de leitura dos sinais em corrente de 4 – 20 mA uma vez que além da transmissão em corrente ser menos suscetível a ruído e vibração, o sinal de 4 – 20 mA permite diferenciar o momento em que o sinal de saída está no seu mínimo com o momento em que não há sinal de saída devido a uma avaria no equipamento.

Quanto às entradas digitais, estas poderiam ser de qualquer valor entre 0 – 30 V DC, pelo que se optou por escolher entradas digitais de 0 – 24 V DC uma vez que:

- Os sinais da carta eletrónica da APU têm uma tensão de 0 – 24 V DC;
- No Eurotram existe uma fonte de tensão de 24 V DC que passa por todo o veículo, a qual será utilizada para alimentar os detetores e, visto que muitos destes funcionam como contactos, então o *output* destes é o *input* que os alimenta, ou seja, os 24 V DC da fonte de alimentação.

Esta fonte de tensão de 24 V DC que passa por todo o Eurotram, entre muitas outras finalidades, é usada para alimentar toda a carta eletrónica (e como tal todas as eletroválvulas e outros dispositivos elétricos da APU) e será também usada para alimentar todos os detetores, transdutores e o sistema de aquisição de dados, o qual pode ser alimentado através de uma fonte de tensão de 24 V DC e tem um consumo de 500 mA, consumo este que é praticamente insignificante tendo em conta que a carta eletrónica poderia alimentar equipamentos que consumissem até 20 A a uma tensão de 24 V DC.

5.2 Requisitos dos equipamentos a montar na APU

Tal como se verificou na secção 5.1, optou-se por adquirir o sistema de aquisição de dados da *Nomad Tech*, no qual podem ser colocados até 8 transdutores cujos sinais de saída terão de ser de 4 – 20 mA e será possível ler até 8 sinais digitais sendo que estes terão de estar entre 0 – 24 V DC.

Além disso, foi tido em conta que todos os equipamentos a instrumentar nos veículos deveriam ser robustos o suficiente para trabalhar em ambiente ferroviário, sendo que se optou por seguir a norma BS EN 50155:2017, a qual, entre muitos outros requisitos, requer que os componentes estejam preparados para trabalhar nas seguintes condições (European Standard EN 50155:2017, 2017):

- Os sensores deverão ser capazes de resistir a tensões em contínuo entre 0.7 a 1.25 vezes a tensão de alimentação, neste caso, 24 V DC. Assim, os equipamentos deverão tolerar operar alimentados por fontes de tensão em contínuo entre os 16.6 V DC e os 30 V DC, e deverão ter proteção contra picos de tensão. Quanto a estes dois requisitos, tal como se constatará mais à frente, apenas o transdutor de corrente não cumpre com o primeiro, uma vez que está dimensionado para operar alimentado com tensões entre os 20 V DC e os 30 V DC;
- Em regime transiente, os equipamentos eletrónicos deverão resistir a tensões de alimentação com mínimo de 14.4 V DC durante pelo menos 0.1 s e de 34 V DC de máximo durante um mínimo de 1 s;
- Resistir a vibrações de 5g e a choques de 5g 30 ms no eixo vertical e de 3g 30 ms nos outros eixos perpendiculares a este;
- Os equipamentos eletrónicos que se encontram dentro de cabines técnicas deverão operar à temperatura OT3 (*Operational Temperature 3*). Como tal, os equipamentos eletrónicos a colocar no interior da caixa da APU deverão estar preparados para operar, segundo a norma, a temperaturas entre os -25°C e os $+70^{\circ}\text{C}$ em contínuo. Visto que o sistema nunca estará abaixo de -10°C , considerou-se esta como a temperatura mínima.

- Segundo a norma supracitada, os equipamentos eletrónicos têm que superar 4 testes de humidade definidos pela norma EN60068. Visto que muitos dos equipamentos eletrónicos presentes no mercado não são submetidos aos testes de humidade referidos por essa norma, para este parâmetro, analisou-se a versão anterior da norma BS EN 50155:2017, ou seja, a norma BS EN 50155:2007. Conforme esta, os equipamentos eletrónicos a operar em ambiente ferroviário deveriam estar preparados para operar sob uma humidade relativa de 95 % durante pelo menos 30 dias por ano, o que corresponde a estarem preparados para sofrer pequenos esguichos de água, ou seja, o segundo dígito do grau de proteção IP destes teria de ser um 4 ou superior. No entanto, face à elevada humidade dentro da APU, aqui considerou-se que seria necessário ser mais conservador. Como tal, definiu-se que os equipamentos eletrónicos a adquirir deveriam resistir a jatos de água, ou seja, o segundo dígito do grau de proteção IP teria de ser um 5 ou superior. Além disso, não poderiam ser suscetíveis a poeiras nem a vários tipos diferentes de poluentes, por isso, para os componentes que estariam fora da caixa que protege a carta eletrónica de controlo da APU e da caixa onde será montado o sistema aquisição de dados optou-se por escolher apenas componentes com uma proteção classe IP65 ou superior;
- Os circuitos elétricos deverão possuir um isolamento galvânico. Para uma tensão de alimentação de 24 V DC, os equipamentos eletrónicos deverão possuir uma resistência de isolamento de 20 MΩ;
- Resistir a inversões de polaridade.

É de notar ainda que além de terem sido escolhidos segundo a especificação de sensores apresentada anteriormente, terem de apresentar um sinal de saída de 4 – 20 mA para os transdutores e de 0 – 24 V DC para os detetores e de serem fiáveis e robustos o suficiente para trabalhar segundo as condições ferroviárias que se regem pela norma supracitada, os equipamentos comprados também teriam de corresponder aos seguintes requisitos:

- Ser passível de ser montado na APU em termos de ter um tamanho e forma que permita que este possa ser colocado dentro da caixa que envolve a APU (pelo espaço disponível dentro da caixa da APU ser reduzido houve muitos equipamentos que tiveram que ser descartados pela sua dimensão ou pelo facto da sua montagem apresentar vários problemas);
- Apresentar conexões elétricas com uma estanquidade IP65 ou superior nas quais possam ser montados os cabos que levarão a informação ao sistema de aquisição de dados;
- Ser o menos intrusivos possível no sistema;
- Garantir que a avaria dos equipamentos a montar não irá provocar avarias na APU;
- Ser os mais baratos do mercado a cumprir com todos os requisitos anteriores, de modo a que a compra total fique dentro do orçamento estipulado.

A acrescentar a estas especificações que terão que ser cumpridas por cada um dos instrumentos de medição a adquirir, também existem especificações necessárias para cada transdutor, as quais constam na tabela 5.1 e especificações para cada um dos detetores, as quais constam na tabela 5.2. É de destacar que estes eram os tipos de transdutores e detetores a adquirir que constavam no plano inicial, mas que posteriormente alguns tiveram de ser descartados por vários fatores.

Tabela 5.1: Especificação dos transdutores.

Especificação dos Transdutores			
Transdutor	Variável a medir	Grau de intrusão	Gama
Pinça amperimétrica	Corrente do motor	Baixo	0 – 12 A
Termopar	Temperatura do óleo	Baixo	50 – 110 °C
Transdutor de pressão	Pressão do ar no compressor (TP2)	Baixo	0 – 11 bar
Transdutor de pressão	Pressão do ar no painel pneumático da APU (TP3)	Baixo	0 – 11 bar
Transdutor de humidade	Humidade do ar comprimido produzido	Médio	0 – 10 %
Caudalímetro	Caudal que é consumido nos clientes	Médio	0 – 500 L/min

Tabela 5.2: Especificação dos detetores.

Especificação dos Detetores		
Detetor	Evento a detetar	Grau de intrusão
Pressostato	Comutação da válvula A4	Médio
Pressostato	Descarga da válvula A5	Muito baixo
Pressostato	Descarga da válvula A7	Muito baixo
Detetor capacitivo	Deteção do nível do óleo abaixo do mínimo	Muito baixo

Quanto à escolha dos detetores e transdutores, após ter sido enviada a especificação inicial na qual se pediram orçamentos para o projeto "chave na mão", optou-se por fazer uma consulta de cada um dos instrumentos de medição a adquirir em catálogos de fornecedores internacionais e de alguns fornecedores nacionais.

Posteriormente, e visto que o tempo de resposta dos fornecedores internacionais sempre se revelou superior ao dos fornecedores mais próximos (e por vezes também mais caro), numa fase mais avançada optou-se por consultar apenas fornecedores da zona norte do país, pois estes além de revelarem um tempo de resposta muito mais rápido, forneciam um suporte técnico muito superior, uma vez que apresentavam disponibilidade para se deslocar ao PMO - *Project Management Office* (local onde se encontram as oficinas onde é feita a manutenção dos veículos da Metro do

Porto S.A.) com alguns dos equipamentos que tinham em stock, o que se revelou muito vantajoso para testar alguns dos instrumentos de medição no banco de ensaios da APU. Estas reuniões revelaram-se extremamente eficientes na determinação de possíveis vantagens e desvantagens de cada um dos equipamentos a adquirir, além de permitirem prever eventuais problemas que poderiam surgir na montagem do instrumento na APU. Mais do que isso, estas reuniões também se revelaram muito proveitosas no que toca à diminuição dos preços dos equipamentos, uma vez que o contacto mais próximo com os fornecedores permitiu negociar diretamente com estes em vez de pedir um orçamento, o que no final do projeto permitiu comprar detetores/transdutores a preços muito mais competitivos.

5.3 Escolha dos detetores e transdutores

Com todas estas consultas de diferentes fornecedores da zona norte do país foi-se atingindo melhores preços para adquirir cada um dos instrumentos de medição a implementar e foi-se alterando um pouco o projeto de sensorização da APU inicialmente definido.

Concluiu-se que o transdutor de humidade poderia ser desprezado uma vez que a informação fornecida por este não era muito relevante tendo em conta o investimento necessário para adquirir este componente. Adicionalmente, este transdutor era um dos componentes mais intrusivos a implementar no sistema, pelo que se optou por não o colocar.

O transdutor de caudal revelou-se consideravelmente mais dispendioso do que qualquer um dos outros transdutores. No entanto, visto este desempenhar um papel fulcral na monitorização da atividade da APU e na deteção de alguns dos modos de falha, nomeadamente na distinção entre os modos de falha que acontecem a jusante da APU dos que acontecem na APU, considerou-se importante a implementação deste. Assim, abdicou-se de colocar o caudalímetro apenas numa das duas APUs a instrumentar, fazendo com que uma destas fique mais completa do que a outra de modo a baixar o custo do projeto total.

Além disso, face à estratégia inicial de deteção dos modos de falha adicionou-se um transdutor de pressão à saída dos reservatórios de modo a detetar a diferença de pressão entre estes e o painel pneumático da APU. Caso esta diferença de pressão venha a aumentar gradualmente (sendo a pressão mais baixa a que é lida nos reservatórios), é possível que estejamos perante uma falha pneumática a jusante da APU, uma vez que o consumo de ar comprimido por parte dos consumidores poderá estar acima do normal, o que poderá ocorrer devido a uma fuga.

Após todas estas iterações feitas ao plano inicial, atingiu-se um plano de sensorização para o qual se requeria a leitura de 6 sinais analógicos para a leitura das seguintes variáveis:

- Corrente de uma das fases do motor trifásico;
- Temperatura do óleo presente no compressor;
- Pressão do ar comprimido no compressor;
- Pressão do ar que se encontra no painel pneumático;

- Pressão do ar à saída dos reservatórios;
- Caudal volúmico a passar da APU para os reservatórios.

E necessitava de se ler 5 sinais digitais lidos diretamente a partir da carta eletrónica da APU e 5 sinais digitais provenientes de detetores a implementar, totalizando um total de 10 sinais digitais:

- Sinal elétrico da eletroválvula de admissão do ar no compressor (COMP);
- Sinal elétrico da eletroválvula A4 (DV);
- Sinal elétrico da eletroválvula que comuta o percurso do ar nas torres secadoras de ar a cada minuto (TORRES);
- Sinal elétrico do pressostato de comando que permite que a APU esteja sempre a uma pressão que vai de 8.2 a 10 bar (MPG);
- Sinal elétrico do pressostato de alarme que é acionado quando a pressão na APU é inferior a 7 bar (LPS);
- Sinal elétrico do detetor capacitivo (a implementar) que desliga quando a quantidade de óleo presente no visor do nível do óleo é inferior ao mínimo estabelecido;
- Sinal elétrico do pressostato (a implementar) que deteta quando a válvula A4 pilota a válvula que efetua a descarga do filtro separador ciclónico e a válvula que efetua a descarga das torres secadoras de ar;
- Sinal elétrico do pressostato (a implementar) que deteta quando o filtro separador ciclónico efetua a descarga;
- Sinal elétrico do pressostato (a implementar) que deteta quando é feita a descarga das torres secadoras de ar;
- Impulso elétrico do contador do caudalímetro (será abordado com detalhe na secção 5.3.8).

Assim, visto que o sistema de aquisição de dados apenas possuía 8 entradas analógicas e 8 entradas digitais, seria necessário eliminar dois dos sinais digitais a ler. A melhor solução que surgiu foi a substituição de dois dos pressostatos por dois transdutores de pressão, fazendo com que no plano final o pressostato que deteta quando a eletroválvula A4 pilota as duas válvulas a jusante desta passasse a ser um transdutor de pressão, assim como o pressostato que deteta a descarga das torres secadoras de ar passasse a ser um transdutor de pressão.

No final, estes seriam os sinais analógicos a ler:

- 1º Corrente de uma das fases do motor trifásico;
- 2º Temperatura do óleo presente no compressor;

- 3º Pressão gerada devido à perda de carga que se dá quando a válvula A4 pilota a válvula que efetua a descarga do filtro separador ciclónico e a válvula que efetua a descarga das torres secadoras de ar;
- 4º Pressão do ar que é comprimido no compressor;
- 5º Pressão do ar que se encontra no painel pneumático;
- 6º Pressão exercida devido à perda de carga gerada quando é feita a descarga das torres secadoras de ar;
- 7º Pressão do ar à saída dos reservatórios.
- 8º Caudal volúmico a passar da APU para os reservatórios;

E estes seriam os sinais digitais a ler:

- 9º Sinal elétrico da eletroválvula de admissão do ar no compressor (COMP);
- 10º Sinal elétrico da eletroválvula A4 (DV);
- 11º Sinal elétrico da eletroválvula que comuta o percurso do ar nas torres secadoras de ar a cada minuto (TORRES);
- 12º Sinal elétrico do pressostato de comando que permite que a APU esteja sempre a uma pressão que vai de 8.2 a 10 bar (MPG);
- 13º Sinal elétrico do pressostato de alarme que é acionado quando a pressão na APU é inferior a 7 bar (LPS);
- 14º Sinal elétrico do detetor capacitivo (a implementar) que desliga quando a quantidade de óleo presente no visor do nível do óleo é inferior ao mínimo estabelecido;
- 15º Sinal elétrico do pressostato (a implementar) que deteta quando o filtro separador ciclónico efetua a descarga;
- 16º Impulso elétrico do contador do caudalímetro.

5.3.1 1º - Transdutor de corrente

A fim de monitorizar os ciclos do compressor, diferenciando os momentos em que este está desligado, a trabalhar em carga ou a trabalhar em vazio, fez-se um estudo de mercado para procurar um sensor para medir o consumo do motor. Além de monitorizar os ciclos do motor, este também irá verificar se o motor está a consumir mais ou menos corrente do que o esperado, o que poderá indicar problemas que possam ocorrer no compressor, por exemplo, por lubrificação deficiente do mesmo.

O transdutor de corrente escolhido para o efeito foi o *AT 20 B420L* da *LEM* apresentado na figura 5.2. Este transdutor será colocado dentro da caixa onde se encontra a carta eletrónica

que controla a APU e irá funcionar do mesmo modo que uma pinça amperimétrica, ou seja, o transdutor irá abraçar um dos três cabos do motor trifásico que estão assinalados a vermelho na figura 5.3 e irá enviar uma corrente para o sistema de aquisição de dados proporcional à corrente que passa no motor.

Este transdutor irá medir uma corrente que poderá chegar até aos 11.5 A (pode medir até $20.0\text{ A} \pm 0.3\text{ A}$ de corrente para uma temperatura ambiente de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quanto à tensão, este está preparado para trabalhar sob os 380 V DC a que o motor é alimentado e poderá suportar sobrecargas de 3.5 kV AC a uma frequência de 50 Hz durante 1 minuto.

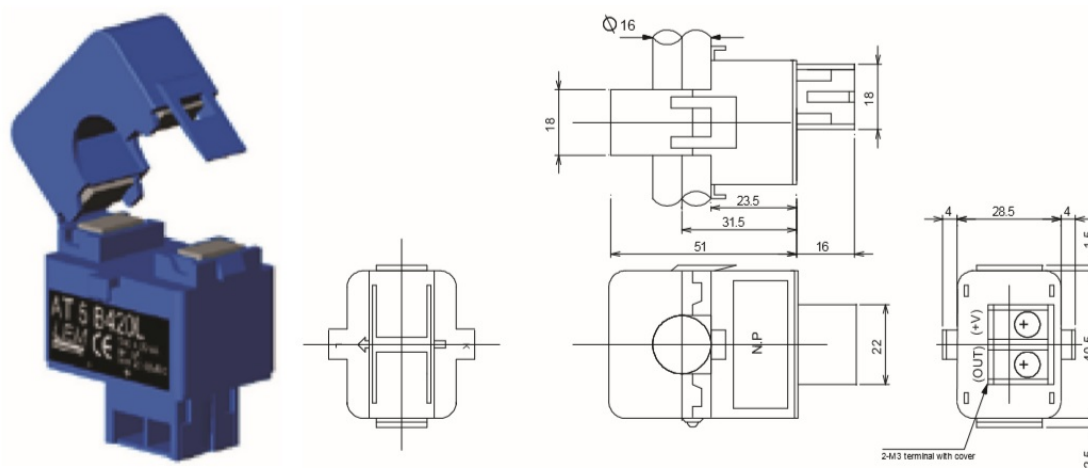


Figura 5.2: Transdutor de corrente *AT 20 B420L* (LEM, n.d.).



Figura 5.3: Local da caixa da carta eletrónica onde se encontram os 3 cabos correspondentes às 3 fases do motor trifásico.

Quanto à classe de isolamento tem uma proteção IP40 que, apesar de estar abaixo do mínimo estipulado na secção 5.2, não causará problemas neste caso uma vez que este equipamento estará dentro da caixa que protege a carta eletrónica e como tal está protegido contra a humidade e pó.

No que toca às tensões a que o detetor tem de resistir em contínuo (entre 0.7 a 1.25 vezes a tensão de alimentação), este não chega a cumprir com este requisito uma vez que deveria poder operar a tensões entre os 16.6 V e os 30 V em contínuo e este apenas está preparado para trabalhar sob tensões entre os 20 V DC e os 30 V DC.

Pode suportar temperaturas máximas de 60 °C que, apesar de ser abaixo dos 70 °C estabelecidos na norma BS EN 50155:2017, não se considera muito problemático uma vez que a norma é conservadora face às condições reais de operação da APU, além de que este transdutor estará no interior da caixa que alberga a carta eletrónica da APU, pelo que estará protegida do calor gerado na atividade do motor, do compressor e nas trocas com o permutador de calor.

Em relação às dimensões, o *AT 20 B420L* tem um diâmetro de aperto de 16 mm, o que é suficientemente grande para poder envolver um dos cabos que alimentam o motor. Mesmo assim, é suficientemente pequeno para caber no espaço ainda disponível na caixa que incorpora a carta eletrónica da APU.

Relativamente ao grau de intrusão, este instrumento é muito pouco intrusivo e a sua avaria não impedirá o funcionamento normal da APU.

Fazendo um balanço entre este e outros transdutores semelhantes, considerou-se que este seria a melhor opção pois, apesar deste transdutor não cumprir todos os requisitos estabelecidos no capítulo 5.2, revelou-se a opção mais barata de todas por uma diferença significativa (chegou-se a pedir orçamentos para o mesmo transdutor a fornecedores diferentes, os quais o vendiam por um preço na ordem do dobro do preço pelo qual este foi adquirido).

5.3.2 2º - Termopar tipo K + Conversor do sinal

Para medir a temperatura do óleo do modo menos intrusivo possível inicialmente pensou-se em colocar um sensor de contacto na parte inferior do compressor (metálico) por ser o local onde se encontra o reservatório do óleo. Numa fase mais avançada chegou-se à conclusão que este método não seria o mais indicado por ser lento a detetar mudanças de temperatura no óleo e por ser demasiado impreciso tendo em conta as variações de temperatura exterior que iriam influenciar muito a temperatura da carcaça do compressor.

Assim, era imperativo adquirir um instrumento que estivesse em contacto direto com o óleo para efetuar a leitura deste, tornando o processo de leitura da temperatura do óleo mais intrusivo e desafiante por vários motivos:

- Para o equipamento estar diretamente em contacto com o óleo, o transdutor teria de suportar óleo quente (temperaturas que podem chegar aos 110 °C) a pressões que chegam aos 11 bar;
- Perfurar o compressor de modo a poder ler a temperatura do óleo e enviar a informação através da sua cablagem para o sistema de aquisição de dados;
- Manter a estanquidade entre o ar e óleo comprimidos presentes no compressor e o exterior;
- Não interferir com nenhum dos procedimentos da manutenção que são feitos atualmente.

A solução mais vantajosa que surgiu foi colocar uma sonda de temperatura no interior do compressor através de um furo passante que seria feito no bujão que é usado para fazer a drenagem do óleo, o qual está assinalado a vermelho na figura 5.4.



Figura 5.4: Bujão de drenagem do óleo.

Este bujão além de ser mais fácil e barato de perfurar do que carcaça do compressor, também impediria o aparecimento de fissuras no compressor devido à furação. Adicionalmente, o local onde se encontra o bujão está sempre coberto de óleo independentemente do compressor estar a trabalhar em vazio ou em carga, além de que no interior do compressor imediatamente à frente deste bujão não existe nenhum componente que possa eventualmente impedir a colocação do transdutor de temperatura.

Apesar de todas estas vantagens, a colocação da sonda de temperatura iria impedir o processo de desenroscar o bujão de modo a drenar o óleo que se encontra no reservatório. Para solucionar este problema, escolheu-se uma sonda de temperatura que encaixa numa peça roscada tal como se pode visualizar na figura 5.5, à esquerda. Deste modo, o furo feito no bujão teria de ser passante, mas roscado e neste iria ser inserida a peça de acoplamento roscada, na qual iria ser acoplado o transdutor de temperatura, na sua parte interna. Assim, quando for necessário fazer a drenagem do óleo, primeiro desacopla-se a sonda da peça roscada de acoplamento. Posteriormente o óleo drena através do orifício que ficou desobstruído pela ausência da sonda de temperatura. Assim que o óleo no interior do reservatório se encontra à altura do bujão, pode-se desenroscar a peça de acoplamento e posteriormente o bujão de drenagem.

Quanto ao transdutor escolhido, optou-se por um termopar por estes instrumentos apresentarem um baixo custo para uma elevada precisão de leitura. O termopar escolhido foi o *TC12-M*

do tipo K (Chromel e Alumel) por ser o mais indicado para medir numa faixa de temperatura de 50 °C a 110 °C (o adquirido pode ler temperaturas que vão desde 0 °C – 200.0 °C $\pm$ 1.5 °C).

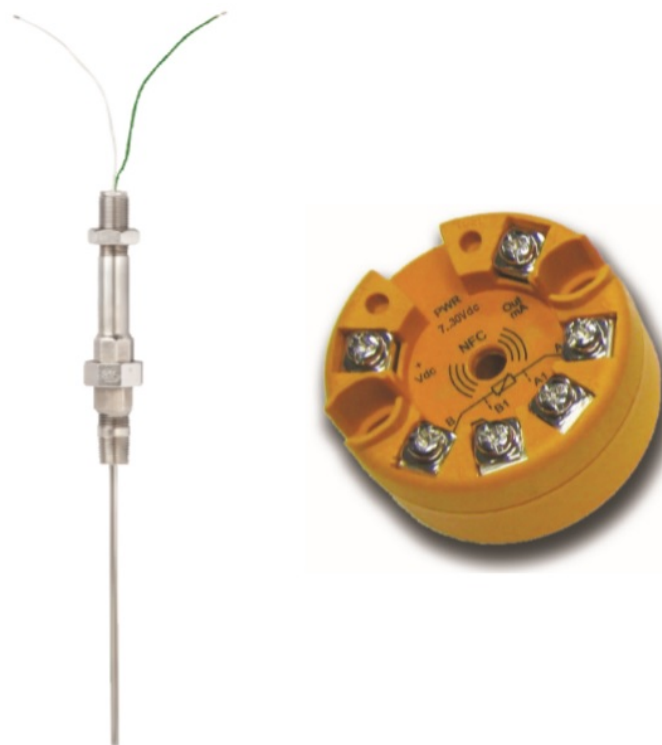


Figura 5.5: Termopar *TC12-M* do tipo K (WIKA, 2019) (à esquerda) + Conversor do sinal (OSAKA, n.d.) (à direita).

O transdutor em questão cumpre com todos os requisitos estipulados na secção 5.2, no entanto o sinal produzido por este apenas poderia ser em muito baixa tensão. Como tal, comprou-se também o conversor de sinal presente na figura 5.5 (à direita) para este converter o sinal da sonda de temperatura para um sinal de corrente de 4 – 20 mA, conversor este que, apesar de apenas possuir uma classe de proteção IP 20, não criará problemas porque estará dentro da caixa onde vai estar o sistema de aquisição de dados alojado, pelo que não contactará com poeiras nem com humidade. Quanto ao sinal enviado do termopar para o conversor este não terá oscilações no sinal de tensão uma vez que o caminho percorrido pelo cabo será muito curto (inferior a 1 metro).

É de destacar que, apesar da necessidade de comprar dois equipamentos para poder efetuar a leitura da temperatura do óleo, esta revelou-se uma solução muito barata tendo em conta todos os orçamentos recebidos para este transdutor.

5.3.3 3º - Transdutor de pressão que monitoriza a eletroválvula A4

A fim de monitorizar a atividade da eletroválvula A4 considerou-se inicialmente colocar um pressostato que detetasse quando a pressão aumenta acima de um determinado valor na conduta a jusante da eletroválvula supracitada. Desde o início que o pressostato se revelou a solução mais económica (muito mais económica do que um sensor que monitorizasse o caudal de ar que passa

na conduta). No entanto, tal como se verificou no início desta secção (secção 5.3), foi necessário diminuir o número de sinais digitais a ler e aumentar o número de sinais analógicos, pelo que se optou por colocar um transdutor de pressão a monitorizar a atividade desta eletroválvula.

Para esse efeito escolheu-se o *PT5414* da *IFM*. Este transdutor é extremamente robusto para o efeito, uma vez que cumpre (e até ultrapassa) com todos os requisitos definidos na secção 5.2.

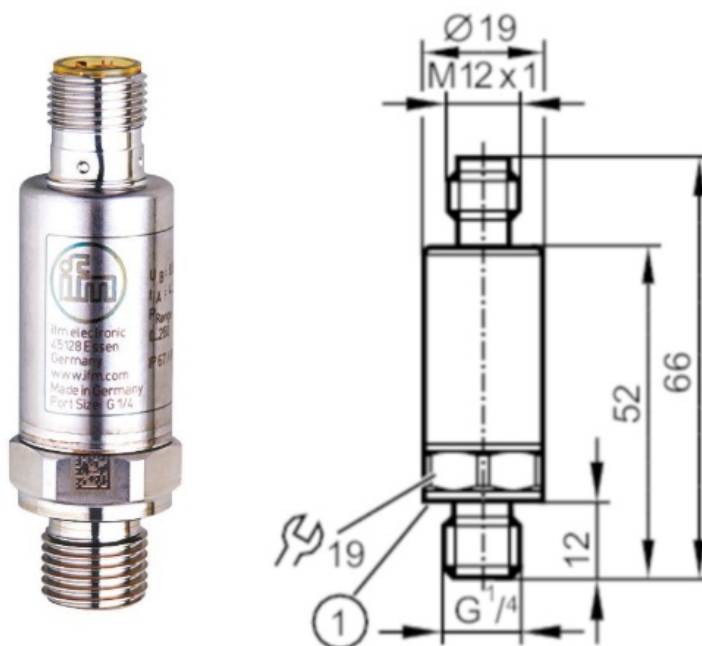


Figura 5.6: Transdutor de pressão *PT5414* (IFM, 2015).

No que toca às especificidades para a leitura de pressão, o transdutor teria de estar preparado para ler uma pressão absoluta que pode chegar aos 11 bar, e como tal foi escolhido um transdutor que lê valores até 16.00 bar ± 0.08 bar de pressão relativa a temperaturas do ar que podem variar entre e -40°C e os 90°C .

Outro fator determinante na compra deste transdutor foi o preço, o qual foi atingido devido ao desconto de quantidade obtido com a compra de 10 exemplares deste equipamento, os quais constituem todos os transdutores de pressão que serão usados neste projeto piloto. Assim, todos os transdutores de pressão mencionados mais à frente foram escolhidos com base nas mesmas razões da escolha deste.

Relativamente à montagem, o *PT5414* terá de ser montado algures na conduta representada a vermelho na figura 5.7. Para tal, a solução mais vantajosa será a montagem de uma ligação em T no local destacado com uma circunferência a vermelho na mesma figura, ligação esta na qual de um lado será montado o transdutor de pressão e na outra extremidade continuará a conduta que conduz o ar até às torres secadoras de ar de modo a obrigar estas a fazer a drenagem.

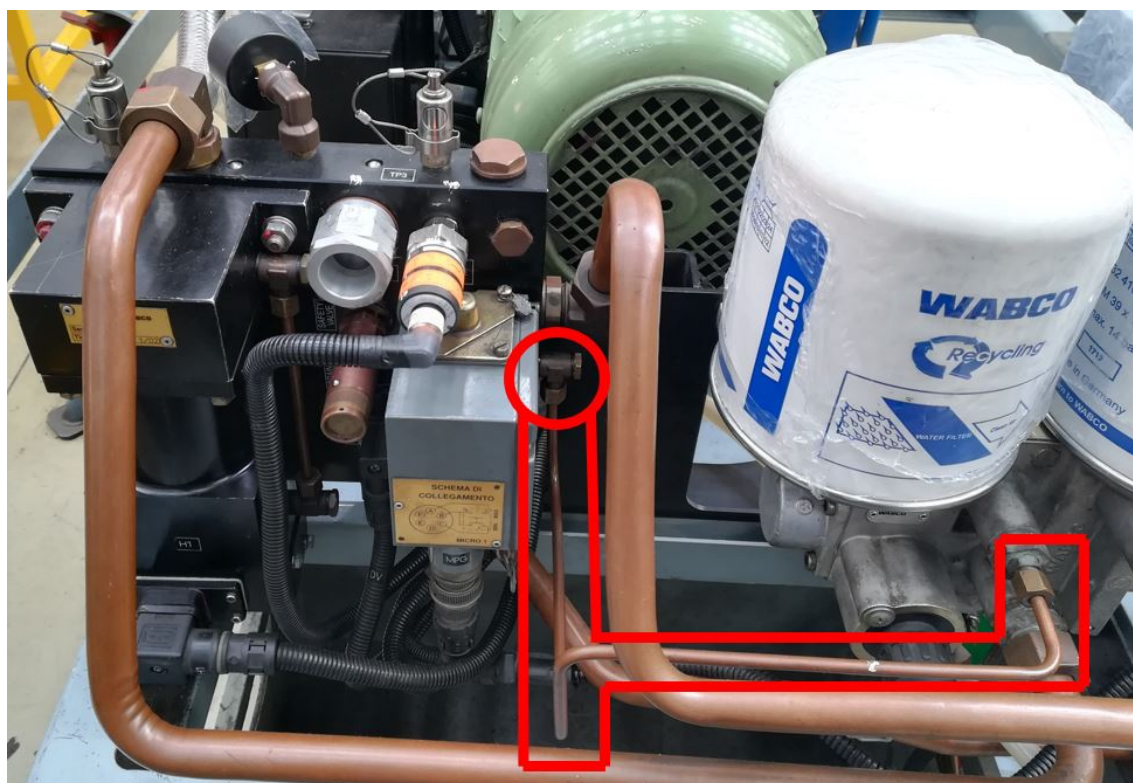


Figura 5.7: Conduto a alterar para colocar o transdutor de pressão.

5.3.4 4º - Transdutor de pressão que monitoriza a pressão no compressor

Para monitorizar a pressão do ar que está a ser comprimido achou-se importante colocar um transdutor para ler a pressão sentida no compressor. Para tal, irá ser colocado outro transdutor *PT5414* para ler a pressão do compressor, pressão esta que pode chegar aos 11 bar de pressão absoluta.

A leitura exclusiva da pressão do ar que se encontra no compressor é possível pois depois do compressor e antes do filtro separador ciclónico, o ar passa por uma válvula de retenção que impede o recuo do ar comprimido caso a pressão no compressor seja inferior à pressão a que o ar se encontra no painel pneumático. Esta válvula existe com o intuito de não haver recuos do ar quando o compressor está desligado ou a operar em vazio durante o movimento do veículo.

O transdutor referido será colocado no furo roscado TP2 (rosca 1/4 NPT) presente no painel pneumático da APU, o qual neste momento tem uma entrada para colocar um manómetro tal como se pode ver no local assinalado a vermelho na figura 5.8. A colocação do transdutor neste local revela-se extremamente vantajosa por ser muito pouco intrusiva e pelo facto do furo roscado já existir.



Figura 5.8: Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a pressão do compressor.

Quanto à manutenção que é feita atualmente, esta não será afetada, uma vez que existe outro orifício (orifício TP1) com uma entrada para colocar um manómetro que tem ligação direta a este local e, como tal, lê a mesma informação que é lida aqui. Assim, na hora de ler a pressão sentida no compressor durante os testes das APUs antes destas serem colocadas nos veículos, poderá colocar-se o manómetro nesse orifício, não afetando o normal desenrolar dos testes.

5.3.5 5º - Transdutor de pressão que monitoriza a pressão no painel pneumático

Pelas mesmas razões apresentadas para aproveitar o furo roscado TP2 para colocar o transdutor referido na sub secção 5.3.4 também se colocou outro transdutor de pressão *PT5414* num furo roscado já existente (no furo TP3), mas neste caso, a jusante da válvula de retenção referida anteriormente para ler a pressão a que o ar se encontra no painel pneumático da APU, pressão esta que é sensivelmente a mesma pressão a que estará o ar até chegar à zona dos reservatórios.

Neste momento, no furo roscado referido também se encontra uma entrada para colocar um manómetro, tal como se pode observar no local assinalado a vermelho da figura 5.9.

A colocação do transdutor de pressão neste local não irá afetar os trabalhos de manutenção uma vez que este orifício normalmente não é usado porque existe um manómetro incorporado na APU (assinalado a amarelo na figura 5.9) o qual mostra a pressão da APU quando são efetuados os testes destas antes de as colocar no material circulante.

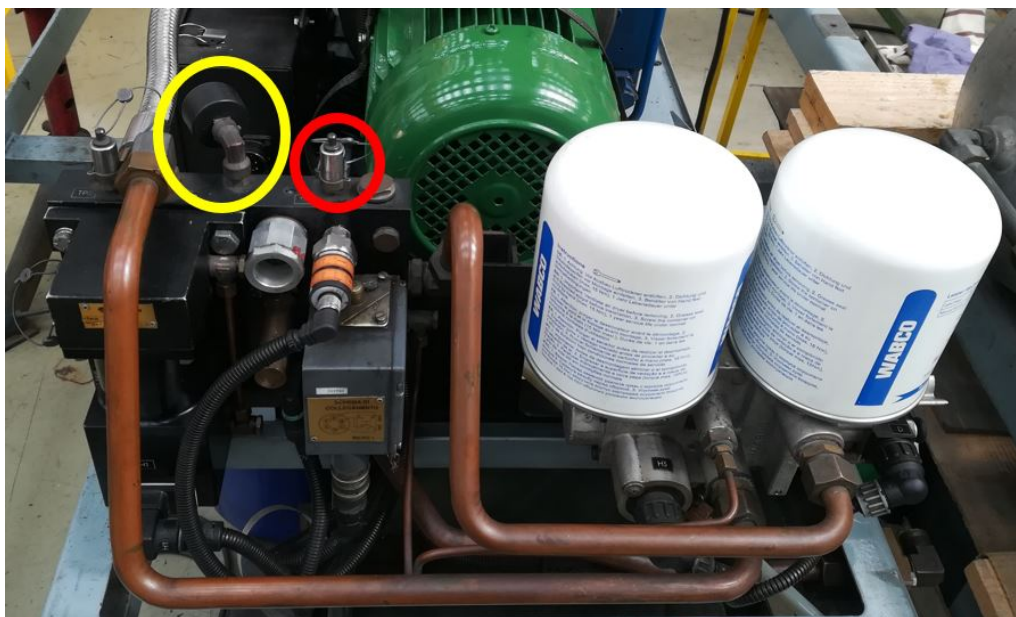


Figura 5.9: Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a pressão do painel pneumático.

Um pormenor importante para a montagem deste e do transdutor de pressão abordado na secção 5.3.4 é que ambas as conexões elétricas pedidas são perpendiculares ao transdutor, ou seja, estas conexões elétricas fazem com que o cabo que sai do transdutor faça um ângulo de 90° com o transdutor de modo a que o cabo não tenha que bater na parte superior da caixa APU nem tenha que ficar dobrado para caber dentro desta. Para ambos os transdutores, verificou-se também se as dimensões destes eram suficientemente pequenas para que estes caibam na caixa da APU.

5.3.6 6º - Transdutor de pressão que monitoriza a descarga das torres secadoras de ar

A fim de averiguar se é feita a descarga das torres secadoras do ar, pensou-se inicialmente em colocar um pressostato que detetasse a diferença de pressão sentida à saída deste local provocada pela perda de carga aí gerada. Pelas mesmas razões apresentadas para colocar um transdutor de pressão em vez de um pressostato para detetar a atividade da eletroválvula A4 (secção 5.3.3), também aqui será colocado um transdutor de pressão e também este será um *PT5414* pelas razões referidas anteriormente para a escolha deste.

No que toca ao modo como é feita a drenagem das torres secadoras do ar, neste momento o ar comprimido e com humidade entra na conexão em T assinalada a vermelho na figura 5.10 pela entrada superior. Das duas extremidades inferiores, uma delas tem uma mangueira que está ligada à válvula que efetua a descarga do filtro separador ciclónico e a outra mangueira tem ligação ao exterior da caixa da APU, de modo a que ambas as descargas (filtro separador ciclónico e torres secadoras do ar) sejam drenadas para o exterior através de uma só mangueira. Deste modo, o ar

húmido drenado nestes dois componentes é junto a fim de só ser necessário fazer uma descarga para o exterior.



Figura 5.10: Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a descarga das torres secadoras de ar.

Como tal, tenciona-se montar o transdutor de pressão na conexão em T no local onde está a mangueira que tem ligação ao filtro separador ciclónico e manter a saída para o exterior através da mesma mangueira por onde é feita a descarga atualmente.

5.3.7 7º - Transdutor de pressão que monitoriza a pressão à saída dos reservatórios

Este transdutor será o único que se encontra fora da caixa que envolve a APU, pelo que não constava no plano inicial. No entanto, face à importância que este poderá ter na identificação de alguns modos de falha e tendo em conta que o transdutor em causa seria dos mais baratos a adquirir, explorou-se a possibilidade da sua implementação.

Assim, para esta posição será comprado mais um *PT5414*, o qual será montado numa conexão em T à saída dos reservatórios, tal como se pode verificar no local assinalado a vermelho na figura 5.11.



Figura 5.11: Local onde será colocado o transdutor de pressão que monitoriza a pressão do painel pneumático.

Este transdutor tem como finalidade a distinção das avarias que ocorrem na APU das avarias que ocorrem a jusante desta, uma vez que, comparando o valor de pressão lida aqui com a pressão lida no painel pneumático será possível descobrir onde é que uma eventual falha ocorreu. Assim, caso haja uma diminuição gradual e fora do normal à saída dos reservatórios, tendo em conta que a pressão no painel pneumático não está a diminuir, ou apresenta uma diminuição de pressão inferior à diminuição de pressão observada no painel pneumático, então poderá ter ocorrido uma fuga de ar num dos clientes de ar comprimido. Por outro lado, caso se verifique a situação oposta, isso poderá evidenciar uma falha que ocorreu na APU.

5.3.8 8º e 16º - Caudalímetro

Com a finalidade de averiguar a quantidade de ar comprimido seco que é produzida na APU e que passa desta para os reservatórios pensou-se em colocar um caudalímetro para medir o caudal mássico de ar que sai da APU. Pretendia-se medir o caudal mássico pois seria mais preciso do que medir o caudal volúmico de ar, uma vez que como o ar é um fluido compressível, o seu volume varia com as variações de pressão e temperatura sentidas na APU. Assim, adquirir um caudalímetro que funcionasse segundo o princípio de Coriolis seria a opção ideal uma vez que este método de medição não é afetado por variações de temperatura, nem de pressão, nem de viscosidade do fluido, sendo perfeito para este efeito.

Após um estudo de mercado, verificou-se que a solução apresentada inicialmente viria a revelar-se extremamente dispendiosa, além de que os caudalímetros que funcionam segundo o princípio de Coriolis apresentam dimensões maiores do que outros caudalímetros e a zona onde

este ia ser colocado possuía algumas restrições em termos de espaço livre para colocação deste transdutor. Como tal, teve de se procurar outras alternativas.

Assim, chegou-se ao transdutor de caudal *SD6500* da *IFM*, o qual pode ser observado na figura 5.12. Este caudalímetro cumpre com quase todas as condições exigidas na secção 5.2, no entanto o que levou à escolha do mesmo foi o seu preço bastante económico face ao preço normal deste tipo de equipamentos (cerca de metade do preço habitual de um caudalímetro para operar sob estas condições).

Quanto às condições exigidas na secção 5.2, o caudalímetro não cumpre com as exigências de temperatura (no entanto este estará na APU numa zona afastada do motor, radiador e permutador de calor, pelo que não se encontra numa das zonas mais quentes da APU, fazendo com que o facto de estar dimensionado para operar a uma temperatura máxima de 60 °C não seja problemático). Também não cumpre com as exigências de resistência de isolamento, no entanto este facto também não será muito problemático uma vez que esta conduta não tem nenhum equipamento eletrónico demasiado próximo, pelo que está salvaguardado o isolamento elétrico.

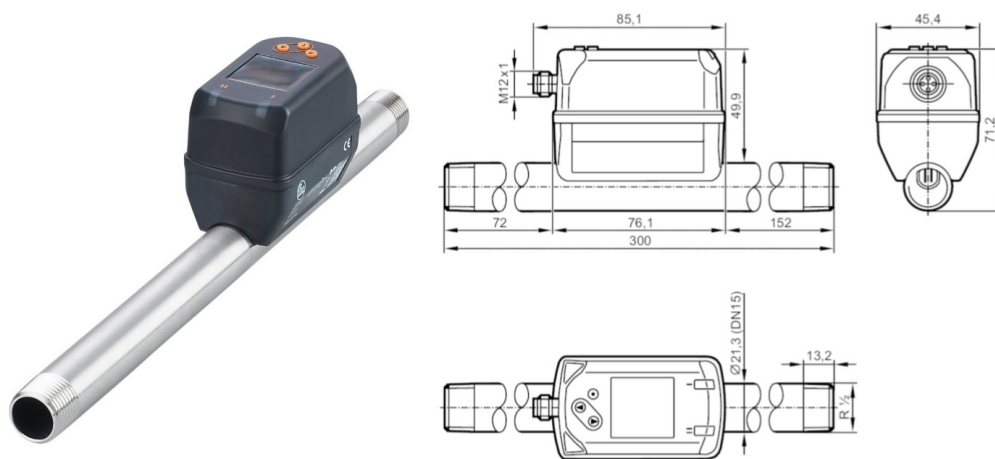


Figura 5.12: Caudalímetro *SD6500* (IFM, 2018).

Este caudalímetro mede o caudal volúmico usando o método do fio quente, ou seja, existem dois fios através dos quais passa o escoamento de ar comprimido, em que apenas um deles é aquecido eletricamente. A diferença de temperatura entre estes é mantida constante através de uma fonte e calor que aí se encontra. Assim, a potência necessária para manter esta diferença de temperatura constante será proporcional à velocidade do fluxo, pois um aumento da velocidade do fluxo leva a uma maior dissipação do calor. A diferença de potencial que resulta desta dissipação de calor que ocorre devido ao escoamento do fluido permite medir a quantidade de ar comprimido que aí passa, uma vez que é sabido o diâmetro da conduta.

Em geral estes equipamentos são suscetíveis a variações de temperatura e de pressão, no entanto o *SD6500* possui uma sonda de temperatura e um transdutor de pressão incorporados de modo a poder fazer a compensação das diferenças de temperatura e de pressão que ocorrem. Aliás, este dispositivo seria capaz de enviar as informações de caudal, pressão e temperatura do ar através de um cabo *Ethernet*. Infelizmente, o sistema de aquisição de dados a montar na APU

já terá a entrada para o cabo *Ethernet* ocupada por parte do módulo de 8 entradas I/O e 8 entradas analógicas, pelo que esta opção não pode ser explorada (havia também a possibilidade de acrescentar mais um *switch* com uma entrada *Ethernet* ao sistema de aquisição de dados, mas esta aquisição iria encarecer muito o projeto).

Como tal, em vez de poder ler todos os 3 sinais analógicos, teve de se optar por ler um só sinal analógico de entre as seguintes opções:

- Saída de comutação fluxo;
- Saída de comutação temperatura;
- Saída de comutação pressão;
- Saída analógica fluxo;
- Saída analógica temperatura;
- Saída analógica pressão;
- Saída de sinal contadores pré-programáveis;
- Saída de impulso contador de quantidade;
- Entrada reinício do contador.

Das quais naturalmente se optou por ter uma saída analógica de fluxo volumétrico com um sinal de 4 – 20 mA.

Além deste sinal analógico, o transdutor de caudal também tem uma saída digital a qual poderá apresentar uma das seguintes opções:

- Saída de comutação fluxo;
- Saída de comutação temperatura;
- Saída de comutação pressão;
- Saída de impulso contador de quantidade;
- Saída de sinal contadores pré-programáveis.

Das quais se escolheu a saída de impulso contador de quantidade para se ficar com uma variável relativa à quantidade absoluta de ar que passa da APU para os reservatórios.

Quanto ao dimensionamento do transdutor, na especificação inicial tinha-se projetado um transdutor para ler caudal volúmico que poderia chegar aos 500 *L/min* de débito de ar livre. Estimou-se este valor pois o compressor da APU admite 280 *L/min* de caudal de débito de ar livre e, visto que quando há uma fuga de ar num dos clientes da APU o caudal de ar que sai da APU é superior ao caudal de ar que entra na APU, então o valor 500 *L/min* surge como uma estimativa plausível uma vez que este valor é quase o dobro do caudal de ar que é admitido no

compressor. Assim, estipulou-se 500 L/min de caudal de débito de ar livre a sair da APU (que corresponde a um valor muito inferior no caso do ar estar comprimido) como o valor máximo de caudal que poderá sair para o exterior numa situação considerada como operação normal. Caudais acima desse valor poderão evidenciar a presença de uma avaria a jusante da APU.

No que toca ao *SD6500*, este faz uma leitura de caudal volúmico de ar em que a gama escolhida (a mais baixa) foi de 1250 L/min $\pm$ 1 L/min de caudal de ar segundo as condições estabelecidas pela norma ISO 2533 (International Organization for Standardization - ISO, 1975), ou seja, as condições de atmosfera padrão internacional.



Figura 5.13: Local da montagem do caudalímetro.

5.3.9 Sinais a ler a partir da carta eletrónica (9º ao 13º)

Apesar do número de avarias devido a falhas elétricas ser muito reduzido comparando com o número de avarias total da APU, considerou-se importante monitorizar alguns sinais da carta eletrónica com o intuito não só de distinguir as falhas elétricas das outras falhas, como também para poder verificar se os outputs medidos pelos sensores estão de acordo com o comando elétrico que lhes é enviado a partir da carta eletrónica. Além disso, ainda existiam entradas disponíveis para leitura de sinais digitais no *MB1000* e a leitura destes sinais é extremamente barata uma vez que apenas será feito um caminho em paralelo que vai ao sistema de aquisição de dados de modo a fazer a leitura dos sinais.

Assim, de modo a distinguir os momentos em que o compressor deveria estar a trabalhar em carga daqueles em que este deveria estar a trabalhar em vazio, será feita uma fiscalização do sinal COMP (9º sinal dos 16 sinais a ler), ou seja, o sinal elétrico presente na carta eletrónica que energiza a eletroválvula de admissão do ar no compressor.

Para verificar se a eletroválvula A4 está a operar segundo o comando que lhe é dado a partir da carta eletrónica, será também feito um acompanhamento do seu sinal elétrico (sinal DV). Esta é a eletroválvula que irá acionar a válvula que efetua a descarga do filtro separador ciclónico e a

válvula que efetua a descarga das torres secadoras de ar. Além da supervisão do seu sinal elétrico (10º sinal a ler), esta eletroválvula também será acompanhada através de um transdutor de pressão tal como já foi referido na secção 5.3.3 pois este é o componente do sistema que provoca mais avarias.

Será também fiscalizado o sinal TORRES (11º sinal a ler), o qual corresponde ao acionamento da eletroválvula que define qual das torres de secagem está a secar o ar comprimido e qual está a regenerar os grãos de sílica gel, sinal este que muda a cada minuto. Apesar de não haver registos da parte da Metro do Porto quanto a avarias relativas a esta válvula, acredita-se que esta terá gerado avarias nos veículos que nunca foram descobertas, uma vez que a falha desta válvula constituiu um modo de falha oculto.

Outro sinal a seguir será o do pressostato de comando (sinal MPG, 12º sinal a ler), pressostato este que deteta quando a APU está fora dos seus valores normais de operação. Assim, este pressostato dispara quando lê uma pressão inferior a 8.2 bar, de modo a que a carta eletrónica acione a eletroválvula COMP de modo a que esta abra e faça com que o compressor passe a trabalhar em carga a fim de aumentar a pressão na APU. Quando é atingida uma pressão de 10.2 bar, o pressostato desliga de modo a que a carta eletrónica deixe de energizar a eletroválvula COMP, de modo a que o compressor volte a trabalhar em vazio, baixando a pressão.

O quinto e último sinal a ler a partir da carta eletrónica será o sinal do pressostato de pressão mínima (13º, sinal LPS), sinal este que está permanente ligado durante a operação normal do veículo, e apenas desliga quando o pressostato em questão deteta uma pressão na APU inferior a 7 bar. A análise deste sinal permitirá detetar falhas neste pressostato, as quais constituem falhas ocultas e no passado eram muito frequentes antes de se ter substituído estes pressostatos por outros mais fiáveis.

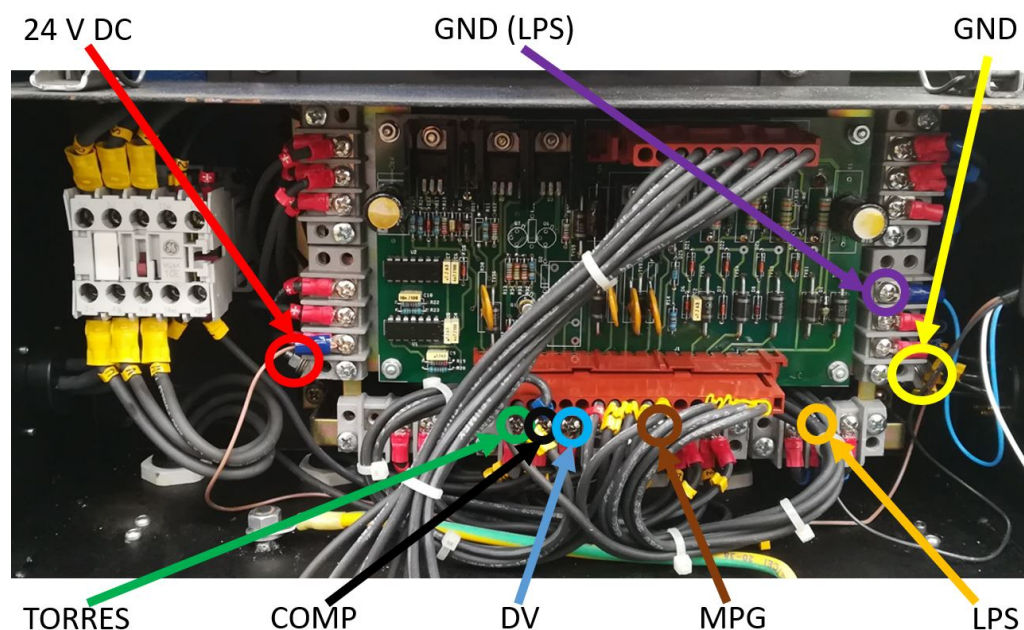


Figura 5.14: Sinais a ler a partir da carta eletrónica.

5.3.10 14º - Sensor capacitivo

Vários modos de falha da APU estão associados a problemas de lubrificação. Como tal, considerou-se primordial a colocação de algo que controlasse a quantidade de óleo presente no compressor.

Este foi o problema para o qual surgiram as soluções alternativas mais diversificadas. Pensou-se em colocar uma bóia com uma parte metálica no visor do nível do óleo, no entanto esta solução não seria fiável uma vez que o visor do nível do óleo apresenta dimensões muito reduzidas, tal como se pode constatar na figura 5.15 onde o visor do nível do óleo está destacado a vermelho.



Figura 5.15: Visor do nível do óleo.

Depois ponderou-se colocar um tubo com um transdutor ultrassónico na sua extremidade que averiguasse a distância a que o óleo se encontrava deste e, como tal, a quantidade de óleo presente no compressor. Rapidamente se desistiu desta ideia uma vez que se iria revelar muito dispendiosa e extremamente intrusiva no sistema.

Considerou-se colocar um transdutor de pressão à entrada do filtro do óleo de modo a monitorizar a pressão do óleo mas, mais uma vez, esta solução poderia revelar-se demasiado intrusiva além de que não se sabia bem até que ponto as variações da pressão do óleo naquele local poderiam ser notórias ao ponto de ajudarem a determinar a quantidade de óleo no compressor.

Avaliou-se ainda a possibilidade de colocar um transdutor de nível de bóia flutuante no interior do compressor, no entanto esta solução além de se mostrar um pouco dispendiosa (visto que o transdutor teria de ser robusto o suficiente para trabalhar sob óleo que pode ultrapassar temperaturas de 100 °C a 11 bar de pressão absoluta). Além disso, a passagem do sinal para o exterior do

compressor seria extremamente complicada, uma vez que não se iria furar a carcaça do compressor. A forma mais plausível era fazer um furo num dos bujões do compressor, tal como foi feito para inserir o termopar no interior do compressor (secção 5.3.2).

Surgiu ainda a alternativa de colocar uma câmara que através de visão artificial iria captar imagens do visor do nível do óleo para se inferir o nível deste. Esta solução além de não ser das mais baratas, apenas iria durar algum tempo, uma vez que com as constantes subidas e descidas do óleo quente no visor do nível do óleo, este tubo vai-se tornando um pouco baço, dificultando a deteção do local onde se encontra o nível do óleo.

Após todas estas tentativas de colocar um transdutor, concluiu-se que a melhor solução seria a colocação de um detetor por ser muito mais barato e menos intrusivo. Assim, rapidamente surgiu a ideia de colocar um detetor capacitivo na zona do visor do nível do óleo, uma vez que o tubo do visor do nível do óleo é de plástico.

A colocação deste detetor viria a trazer outro inconveniente: onde o colocar. Durante a operação do veículo, existem 4 níveis possíveis onde o óleo se poderá encontrar no visor:

- O mais alto que corresponde ao momento em que o compressor está desligado (pois o óleo encontra-se na sua totalidade no reservatório, o que faz com que o visor do nível do óleo apresente uma maior quantidade de óleo);
- Pouco acima do meio do visor, que acontece quando o compressor está a trabalhar em vazio (apenas uma pequena quantidade de óleo entra no espaço entre palhetas de modo a lubrificar o compressor);
- Cerca de 8 mm abaixo do nível anterior, nível este que é atingido quando o compressor trabalha em carga, mas o óleo presente no reservatório se encontra a uma temperatura inferior a 75 °C (uma grande quantidade do óleo entra no compressor para o lubrificar);
- Cerca de 5 mm abaixo do nível anterior, nível este que é atingido quando o compressor trabalha em carga, mas o óleo presente no reservatório se encontra a uma temperatura superior a 75 °C (uma grande quantidade do óleo entra no compressor para o lubrificar e outra parte deste passa pelo radiador, diminuindo muito a quantidade de óleo presente no reservatório, e por essa razão constituindo o nível mínimo do óleo atingido em situações normais de operação).

Terá de ser tido em conta que o nível do óleo irá subir 1 ou 2 mm em todos os 4 níveis possíveis onde o óleo se pode encontrar no visor uma vez que a colocação do transdutor de temperatura do óleo no interior do compressor irá ocupar espaço anteriormente ocupado pelo óleo.

Deste modo, o detetor capacitivo adquirido foi o *KQ6001* da *IFM* (figura 5.16), o qual será colocado junto ao visor do nível do óleo localizado de modo a disparar quando o nível do óleo se encontrar 2 mm abaixo do nível mínimo atingido pelo óleo em condições normais de operação (quando o compressor trabalha em carga e o óleo presente no reservatório se encontra a uma temperatura superior a 75 °C).

Este detetor é robusto o suficiente para cumprir com todos os requisitos definidos na secção 5.2, além de que chegou a ser testado na banca de testes da APU em Guifões revelando um elevado nível de fiabilidade para o efeito (muito mais preciso do que outros também testados no local).

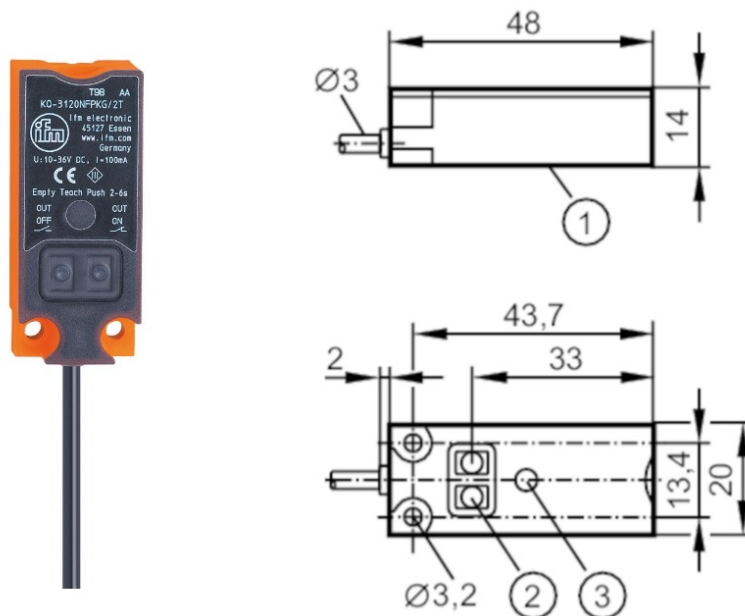


Figura 5.16: Detetor capacitivo *KQ6001* (IFM, 2013).

Relativamente à montagem deste, será feita uma estrutura de suporte de modo a que este seja colocado no espaço entre a carcaça do compressor e o tubo que corresponde ao visor do nível do óleo, com a face assinalada com o número 1 na figura 5.16 (que corresponde à face que efetua a leitura da capacitância) virada para o visor de nível do óleo para que a carcaça metálica do compressor não interfira na medição da capacitância medida pelo detetor.

Este detetor estará ligado sempre que detetar a presença de óleo (condições de operação normais) e desligará quando não o detetar, altura em que o óleo se encontra abaixo dos valores mínimos, evidenciando a possibilidade de uma avaria.

5.3.11 15º - Pressostato de deteção da descarga do filtro separador ciclónico

Um dos componentes mais problemáticos da APU é a válvula que efetua a descarga do filtro separador ciclónico. Como tal, pensou-se em colocar um pressostato para detetar se a descarga é efetivamente feita.

O *PSM01* da *WIKA* presente na figura 5.17 constitui uma boa alternativa pois cumpre com todos os requisitos estipulados na secção 5.2 e possui uma gama de valores a partir dos quais pode ser feita a escolha do ponto de comutação do pressostato muito alargada. Este foi um atributo de distinção face a outros pressostatos uma vez que seria difícil estimar o melhor valor possível para o pressostato disparar. Como o pressostato pode ser regulado entre os 0.5 e os 8 bar (pressão relativa), então poderá ser possível testar este antes de atingir o ponto de comutação ideal.

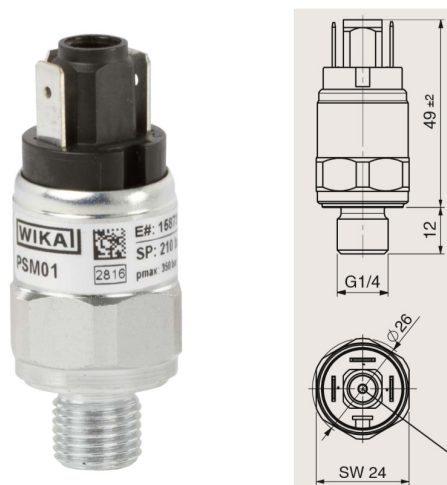


Figura 5.17: Pressostato *PSM01* (WIKA, 2017).

Quanto à montagem, será colocada uma ligação em T no local assinalado a vermelho na figura 5.18, o qual corresponde à saída que liga à mangueira por onde é feita a descarga do filtro separador ciclónico (na imagem a mangueira está desmontada e pousada). À ligação em T que será acoplada a esta saída pretende-se manter a mangueira que efetua a descarga numa das saídas e na outra saída do T pretende-se colocar o pressostato. Assim, este instrumento poderá detetar as descargas do filtro separador ciclónico através do aumento de pressão gerado neste local resultante da perda de carga que se dá devido à descarga.

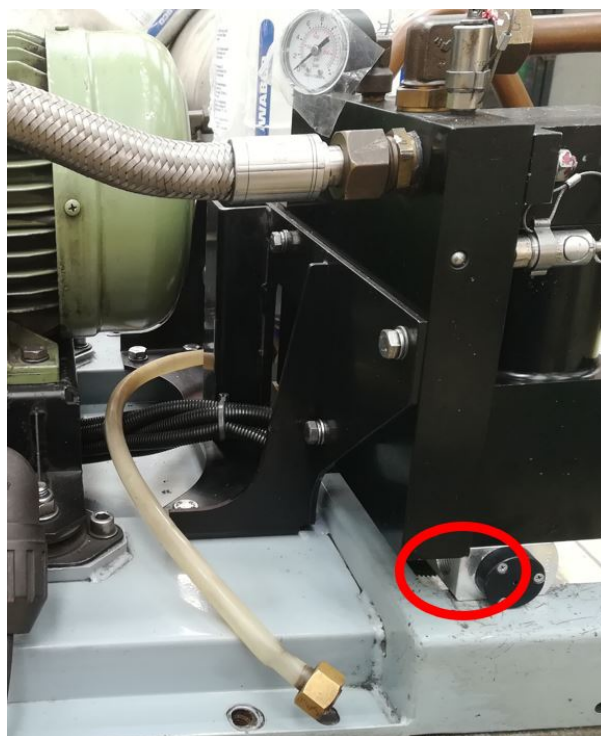


Figura 5.18: Local da montagem do pressostato *PSM01*.

5.4 Montagem e orçamentos

Com todos os detetores e transdutores definidos foi possível fazer a tabela 5.3 na qual constam todos os instrumentos adquiridos, os seus modelos e marca, a gama e quantidade comprada para sensorizar os dois veículos que serão instrumentados.

Tabela 5.3: Instrumentos de medição comprados.

Especificação dos transdutores/detetores comprados			
Sensor	Modelo e marca	Quantidade	Gama
Transdutor de corrente	<i>AT 20 B420L</i> da <i>LEM</i>	2	20.0 A $\pm$ 0.3 A
Termopar tipo K	<i>TC12-M</i> da <i>WIKA</i>	2	0 °C – 200 °C
Conversor de sinal	Conversor Universal NFC da <i>OSAKA</i>	2	-
Transdutor de pressão	<i>PT5414</i> da <i>IFM</i>	10	16.00 bar $\pm$ 0.08 bar
Transdutor de caudal	<i>SD6500</i> da <i>IFM</i>	1	1250 L/min $\pm$ 1 L/min
Detetor capacitivo	<i>KQ6001</i> da <i>IFM</i>	2	-
Pressostato	<i>PSM01</i> da <i>WIKA</i>	2	Setting range: 0.5 – 8 bar

Estando o processo de compra de todo o hardware a implementar perto de estar finalizado, procedeu-se à criação de uma especificação para a montagem do mesmo e procurou-se uma entidade capaz de fazer a montagem a um preço competitivo, serviço este que acabou por ser comprado à *EMR* (Engenharia, Manutenção e Representações, Lda.), empresa esta que já tem realizado alguns trabalhos de montagem de equipamentos e alteração da estrutura em alguns veículos da Metro do Porto S.A., pelo que é uma empresa conhecedora do material circulante da Metro, dando garantias de que é uma entidade indicada para o efeito. A *EMR* ficará responsável pela montagem de todos os equipamentos, a qual inclui a abertura do furo no bujão presente no compressor, a alteração de *pipping* na conduta em que será colocado o caudalímetro e na conduta por onde passa o ar vindo da válvula A4 para acionar a descarga das torres secadoras de ar, a montagem da caixa e da estrutura que suportará o *MB1000* e da estrutura que suportará o detetor capacitivo. Além disso, caberá à *EMR* fornecer todos os cabos, adaptadores necessários para acoplar alguns dos sensores aos furos roscados da APU, as peças necessárias para montar a caixa que alojará o *MB1000* e os suportes da mesma e os dois transdutores de corrente *AT 20 B420L* da *LEM* que irão ler a corrente consumida por uma das fases do motor trifásico.

5.4.1 Orçamentos

Contas feitas, no final o projeto totalizou um orçamento total de 11 420.76 €, orçamento este que se encontra um pouco acima dos 10 000 € orçamentados inicialmente. Como tal, e visto que este projeto é financiado por fundo públicos, foi necessário fazer-se uma adjudicação do

orçamento inicial, na qual tiveram de ser justificados todos os gastos necessários para sensorizar os dois veículos de modo a que esta adjudicação fosse aprovada.

Apenas após a obtenção de todos os orçamentos necessários para implementar o *FailStopper* e após a aprovação da adjudicação é que se pode iniciar-se o processo de pagamento dos mesmos.

Capítulo 6

Sistema de Aquisição de Dados e Protocolos de Comunicação

No capítulo 5 foi descrito o processo de seleção de cada um dos transdutores e detetores, assim como o modo como cada um destes será montado na APU. Referiu-se ainda que o sistema de aquisição de dados escolhido para guardar e enviar as informações lidas por estes seria o *MB1000* da *Nomad Tech*, o qual pode ser visualizado na figura 6.1. Neste capítulo será feita uma breve descrição deste, dos protocolos de envio de dados desde os veículos para o servidor e serão abordadas algumas particularidades quanto aos dados adquiridos e ao modo como serão tratados.



Figura 6.1: *MB1000 Box* da *Nomad Tech* (Nomad Tech, n.d.b).

6.1 MB1000

Quanto à escolha do sistema de aquisição de dados, considerou-se fulcral que este fosse robusto o suficiente para trabalhar em ambiente ferroviário, ou seja, deveria cumprir com a norma BS EN 50155:2017 ou uma equivalente (o *MB1000* cumpre com a norma BS EN 50155:2007, que é a versão anterior desta norma) e deveria poder ser alimentado por uma fonte de tensão de 24 V DC ou de 380 V AC. Estes valores de tensão surgem uma vez que existe uma fonte de tensão de 24 V DC que percorre todo o comboio e que é usada para alimentar a carta eletrónica da APU e existe uma fonte de tensão de 380 V AC para alimentar o circuito de potência do motor trifásico que aciona o compressor. Dentro daqueles que cumpriam com estes requisitos, os fatores de distinção principais para escolher o sistema de aquisição de dados foram o preço, o número de sinais que este podia ler, o facto de apresentar antena, *software* e os protocolos de envio dos dados para a terra incluídos e possuir GPS.

O preço foi a característica que se revelou mais preponderante na escolha do *MB1000*, uma vez que o orçamento proposto pela *Nomad Tech* para a compra de dois exemplares do *MB1000* era menos de metade do preço da maioria das outras propostas recebidas para adquirir sistemas de aquisição de dados para instalar em dois comboios. Aliás, apenas uma pequena percentagem dos orçamentos recebidos foram inferiores aos 10 000 € que correspondiam ao orçamento que estava alocado para a sensorização completa dos dois veículos. Para este componente foram consultadas algumas entidades nacionais, mas sobretudo internacionais, uma vez que a manutenção preditiva de veículos ferroviários ainda não tem um mercado vasto em Portugal. O facto de que o *MB1000* é um equipamento customizado, leva a que apenas sejam incluídas as conexões e entradas que o consumidor necessita, logo só é pago aquilo que é incorporado no sistema, pelo que o preço deste é mais reduzido relativamente a outros sistemas de aquisição de dados.

Relativamente à alimentação do *MB1000*, este pode ser energizado por uma fonte de tensão de 24, 48, 72, 96 ou 110 V DC, pelo que será ligado através da fonte de 24 V DC que aciona a carta eletrónica da APU. A entrada de energia será protegida contra inversões de polaridade, picos de corrente e sobretensões que podem ir até aos 2000 V DC. Alimentado a 24 V DC, este irá consumir uma corrente de 500 mA.

No que toca ao número de sinais que podem ser lidos, o *MB1000* apresentará um módulo com 8 entradas analógicas e 8 entradas digitais, as quais seriam suficientes para a leitura dos sinais definidos no plano inicial de sensorização, plano que era o que estava a ser seguido na altura do primeiro contacto com a *Nomad Tech*.

Por outro lado, o preço apresentado pela *Nomad Tech* incluía a aquisição e o envio de dados, assim como todo o *hardware* e *software* necessário para o efeito. Além disso, este possui um GPS incorporado, o qual será determinante para se fazer uma relação entre o material circulante e o contexto de operação.

Por último, com o desenrolar do projeto, constatou-se que o tamanho da caixa de aquisição de dados também era um fator importante a ter em conta, uma vez que o espaço no interior da caixa da APU é reduzido e nem todos os sistemas de aquisição de dados apresentavam dimensões

que permitissem a montagem destes neste local. No que diz respeito ao *MB1000*, este é pequeno o suficiente para ser montado na APU, tal como se pode constatar através de medições feitas no local, posteriormente à receção de um documento com as dimensões de um sistema de aquisição de dados com dimensões similares às do que foi encomendado à *Nomad Tech*, as quais podem ser observadas na figura 6.2.

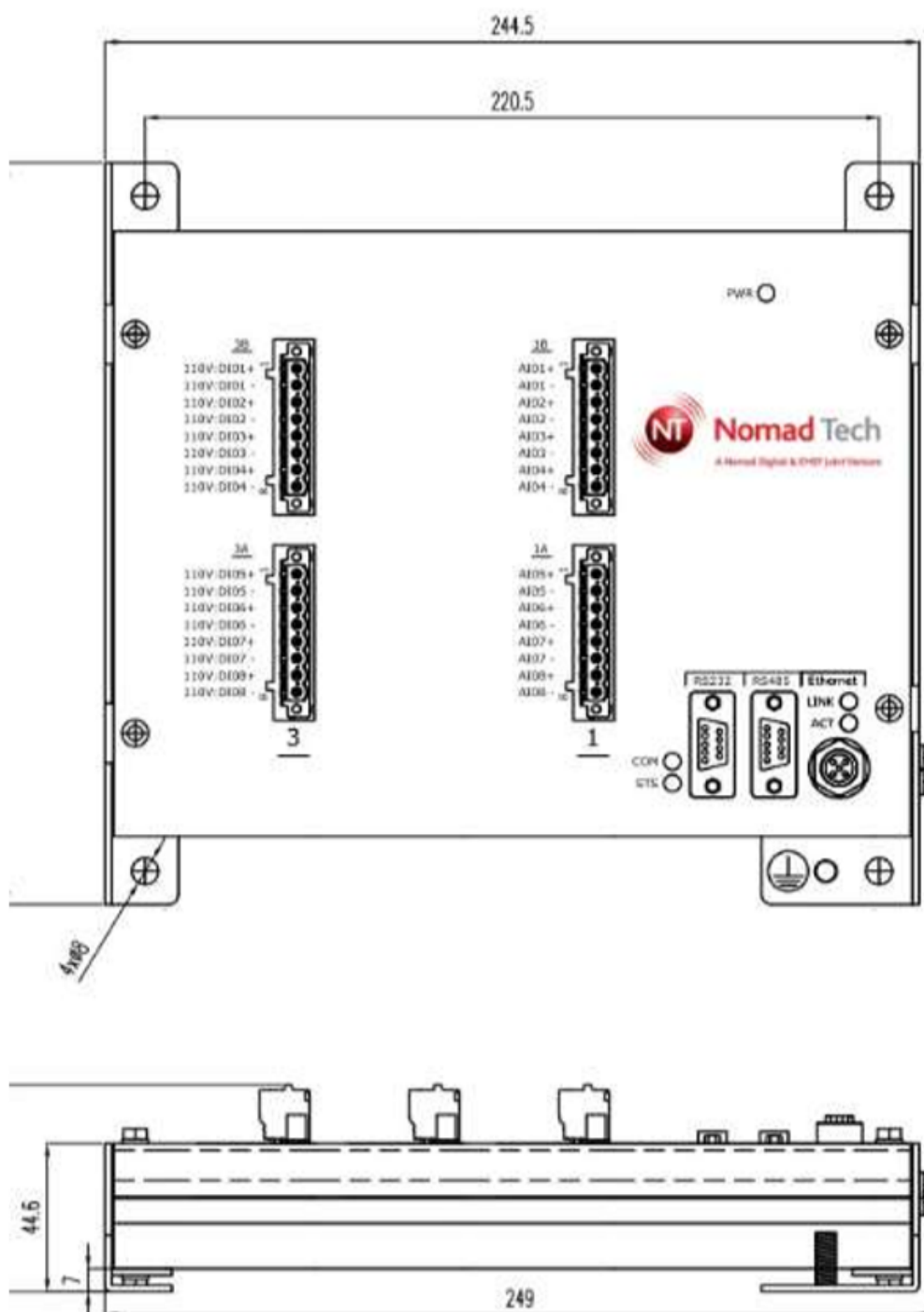


Figura 6.2: Dimensões da caixa do *MB1000* da *Nomad Tech* (Nomad Tech, n.d.a).

É necessário ter em conta que na figura 6.2 está representado um exemplar de um *MB1000* que não corresponde àquele que foi adquirido, uma vez que o número e as gamas das entradas dos sinais a ler não serão as mesmas, no entanto as dimensões serão. Outro aspeto importante é que, tal como se pode reparar na figura supracitada, o *MB1000* possui uns olhais que irão facilitar na montagem deste na APU.

O *MB1000* é um equipamento construído pela *Nomad Tech* cuja arquitetura está patenteada pela referida entidade, assim como o *software* que nele corre. O equipamento não necessita de manutenção, pode ser atualizado e configurado remotamente, possui LED's que proporcionam uma visualização do estado de operação do mesmo, é configurável de acordo com os projetos (podem ser adicionados apenas os módulos escolhidos de acordo com o projeto e dispõe de uma vasta gama de diferentes módulos) e possui o *Software Nomad ROCM On-board*, podendo guardar e enviar informação adquirida de múltiplos sub-sistemas do veículo. Além de tudo isto, o contrato assinado na compra deste inclui ainda 5 anos de garantia.

No que toca às condições de operação, tal como referido anteriormente, é suficiente robusto para operar em ambiente ferroviário, cumprindo com todas as exigências referidas na secção 5.2 pois, apesar de ter um grau de proteção IP54, como estará dentro da caixa de proteção do sistema de aquisição de dados, não estará sujeito a poeiras nem jatos de água. Tem compatibilidade magnética (EMC) segundo a diretiva BS EN 50155:2007 de modo a que não sofra interferência por parte de ondas rádio nem de outros sinais que possam afetar o sinal enviado pelo *MB1000* para a *cloud*. Além disso, possui um *mean time between failure* de 250 000 horas (o que equivale a cerca de 43 anos a operar durante 16 horas por dia), tempo este que corresponde a uma estimativa do tempo médio que o equipamento poderá operar antes de apresentar a primeira avaria (*Nomad Tech*, n.d.b).

Considerando as interfaces, este possui um GPS de grande sensibilidade incorporado, um cartão SD de 8 GB (podem ser ainda adicionados mais dois destes), uma antena para o envio de dados, espaço para dois mini cartões SIM, 4 luzes LED para fácil visualização do estado do equipamento (*Nomad Tech*, n.d.b). Em termos de *software*, no *MB1000* está instalado o *NT-Telem* (responsável pela aquisição dos dados e pela criação dos ficheiros de *data logger*, e o *NT COMM* (responsável pelo envio de dados para a terra), ambos criados pela *Nomad Tech*.

Em relação às entradas, tal como já foi referido, o *MB1000* é um equipamento customizado. Assim sendo, apenas foi adquirido o essencial, isto é, um módulo com 8 entradas analógicas e 8 entradas digitais que será ligado através de um cabo *Ethernet* (LAN). Todas as entradas digitais estarão galvanicamente isoladas através de optoacopladores. Este isolamento é uma medida de segurança tomada a fim de proteger o equipamento de altas tensões, uma vez que através deste não há uma condução direta de corrente, fazendo com que nestes dois circuitos possam circular diferentes tensões. Quanto ao modo como isto é realizado, o optoacoplador é um dispositivo que possui um emissor e um recetor de luz LED, fazendo com que a transmissão do sinal seja feita ópticamente, impedindo a ligação direta entre os dois circuitos.

Caso fosse necessário e o orçamento assim o permitisse, podiam ainda ser adicionadas até 4 entradas série configuráveis (RS232 ou RS485), uma entrada USB e até 3 conectores para antena

(no equipamento comprado apenas existe um destes).

6.2 Protocolos de Comunicação

A informação lida nos transdutores e nos detetores é adquirida no sistema de aquisição de dados com uma peridiocidade de 1 segundo. Apesar de no plano inicial se ter definido diferentes frequências de amostragem para os diferentes instrumentos de medição, o *MB1000* tem de fazer a aquisição de dados com uma frequência de amostragem igual para todos os detetores/transdutores, pelo que se escolheu 1 segundo por corresponder à maior frequência de amostragem alcançável por este equipamento fornecido pela *Nomad Tech*. Idealmente, a atividade dos detetores iria ser monitorizada por evento, ou seja, apenas quando houvesse uma transição destes é que seria registada essa transição. No entanto, o *MB1000* não realiza esse tipo de deteção, pelo que a cada segundo será registado o valor (ligado ou desligado) de cada variável digital.

Assim, a cada segundo será registado o valor de cada uma das 8 variáveis digitais, das 8 variáveis analógicas, um *timestamp* para registar quando foi lida a informação e a localização do veículo (sinal GPS). Toda esta informação será registada em linhas num ficheiro ao qual se chama o *data logger* e o qual corresponde ao ficheiro dos dados adquiridos. A cada 300 linhas, ou seja, a cada 5 minutos de aquisição de dados, esse ficheiro será enviado para o servidor do INESC TEC usando um protocolo FTP (*File Transfer Protocol*).

6.2.1 Protocolo FTP

O FTP é uma aplicação do protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Foi criado com o intuito de permitir transferir informação entre dispositivos conectados no mesmo *network* mas que não tenham obrigatoriamente de possuir o mesmo sistema de operação nem o mesmo *hardware*.

Este protocolo de comunicação mostra-se como uma das maneiras mais rápidas de transferir ficheiros de um computador para um servidor, é extremamente eficiente por avançar algumas etapas face a outros protocolos, é seguro (o acesso ao servidor FTP pode pedir um nome de utilizador e uma *password* caso assim se pretenda) e possibilita ao cliente o *download* e *upload* de ficheiros.

É um protocolo cliente - servidor de envio de ficheiros que necessita de duas ligações entre os dispositivos:

- Conexão para tradução do protocolo, responsável trocar os comandos de controlo entre os dispositivos, ligação esta que é feita através da porta 20;
- Conexão para transferência de dados, neste caso em forma de ficheiros, ligação esta que é feita através da porta 21.

O processo de envio de dados é iniciado pelo cliente, que neste caso é o *MB1000*. Para que a troca de dados seja feita, é necessário que se processem três diferentes tarefas no cliente e duas no sistema operativo do servidor, tal como se pode observar na figura 6.3.

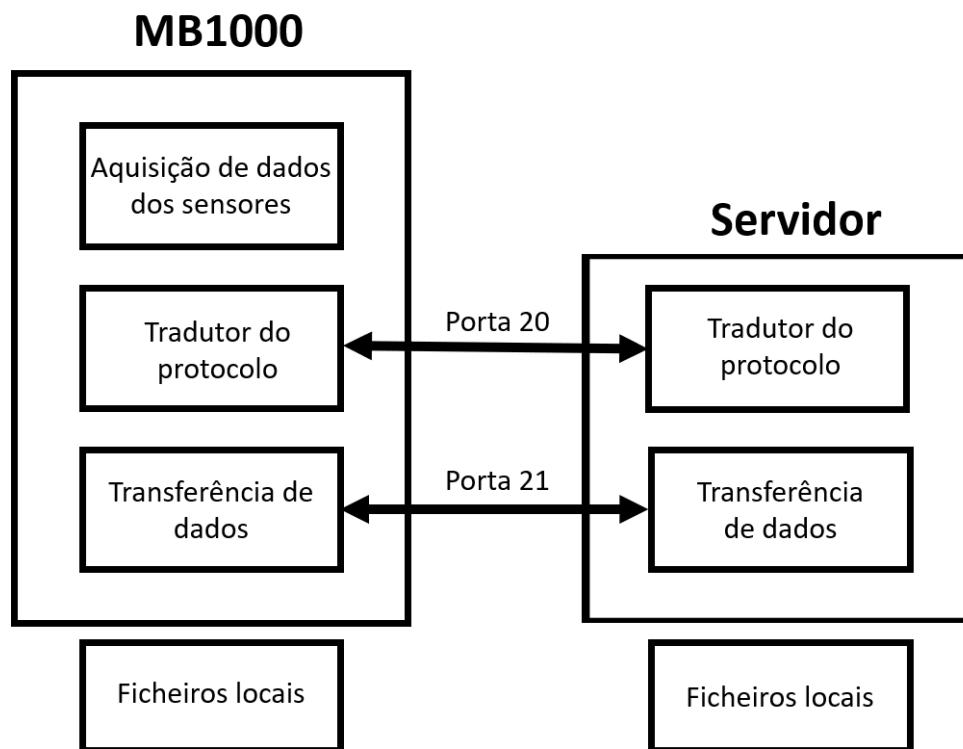


Figura 6.3: Esquema dos processos que correm no *MB1000* e no servidor de modo a ocorrer o envio de dados.

Assim, a aquisição de dados é feita por parte dos sensores montados na APU, informação esta que será registada a cada segundo no *data logger*, criando ficheiros com 300 linhas de dados, uma vez que os ficheiros com a informação da atividade dos equipamentos de medição serão enviados com uma periodicidade de 5 minutos.

Posteriormente, este ficheiro terá que ser enviado do *MB1000* para o servidor. No entanto, dependendo do acesso ser aberto ou não a todos os utilizadores, poderá ter que ser feita a autenticação do utilizador antes desta transferência. Após autenticação, é feita a conexão da parte referente ao controlo do protocolo de envio de dados através da porta de 20 dos dois dispositivos e, caso todas as condições necessárias para a transferência se verifiquem, será aberta a ligação de envio do ficheiro. Esta ligação só é aberta enquanto o documento está a ser transferido e assim que a transferência é concluída, a ligação é interrompida, voltando ser re-aberta apenas quando outro ficheiro for transferido.

Relativamente à transferência da informação, esta pode ser feita através de um de três possíveis modos:

- Modo *stream* - A informação é enviada de forma não estruturada, ou seja, a criptografia é feita incrementalmente, convertendo o texto *bit a bit*, sendo o modo convencional de envio de dados e ideal para comunicações em tempo real pelo facto do envio de dados se desenrolar praticamente instantaneamente;

- Por blocos - O ficheiro é separado em blocos e enviado em *frames* do mesmo modo que seria enviado numa conexão TCP/IP normal;
- Comprimida - os dados são comprimidos em cadeias de dados (ficheiros ZIP).

Quanto ao controlo das transferências, existem três grupos de comandos usados a partir da porta 20 para controlar as transferências:

- Controlo do acesso, isto é, controlo das autenticações dos utilizadores;
- Parâmetros de transferência - define o modo como a transferência se irá processar, nomeadamente que modo será usado;
- Comandos FTP - controla a transferência, enviando e apagando ficheiros.

Deste modo, a informação lida pelos sensores é adquirida e escrita num ficheiro (*data logger*) que será comprimido num ficheiro ZIP e enviado a partir do *MB1000* (representado pelo computador com o ecrã cor de rosa na figura 6.4) para o servidor do INESC TEC (*FTP server*, figura 6.4) através da *cloud* (nuvem), fazendo com que o *data logger* fique acessível a partir do servidor. Seguidamente, será possível aceder a esta informação presente no *data logger* através de um computador pessoal (representado pelos três computadores com o ecrã azul na figura 6.4), de modo a que seja possível fazer o trabalho de *data mining* da informação lida pelos sensores a fim de detetar os padrões de funcionamento da APU, de modo a poder detetar atividade fora destes padrões, de modo a atingir o objetivo deste projeto, que é a previsão de avarias na APU.

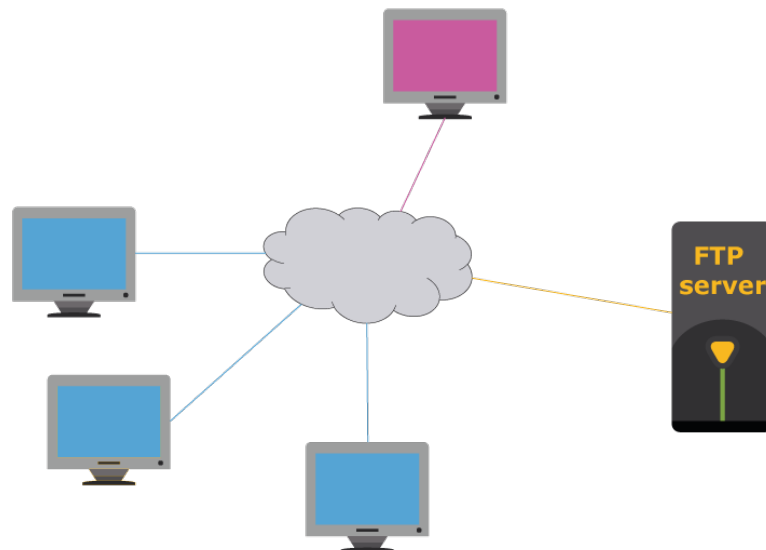


Figura 6.4: Representação das trocas de dados entre *MB1000*, servidor e computador pessoal.

Numa primeira fase, a informação será enviada através de ficheiros ZIP criados a cada 5 minutos, uma vez que os dados apenas serão usados para análise do sistema. Além disso, o envio dos

ficheiros em pastas comprimidas permite a possibilidade de omissão da variável que corresponde à identificação do veículo, uma vez que esta identificação poderá aparecer no cabeçalho do ficheiro ZIP.

Numa fase mais avançada do projeto, depois da criação de códigos de inteligência artificial para prever avarias, os dados passarão a ser enviados em modo *stream* para que o envio de dados seja em tempo real a fim de detetar a aproximação de uma avaria o mais rapidamente possível para que sejam tomadas medidas antes que esta ocorra.

No que toca ao acesso ao servidor, este poderá ser feito de um de dois modos: com ou sem autenticação. Isto é possível pois o INESC TEC possui dois servidores para os quais os dados da circulação poderão ser enviados:

- Servidor 1: para conectar com esta máquina virtual é necessário fazer autenticação, em que o acesso só pode ser feito por VPN (o *MB1000* oferece essa possibilidade). Quanto a características, este servidor possui 16 CPUs, 32 GB RAM, 50 GB disco local + 100 GB partilha NFS (possibilidade de expansão) e o sistema operativo é o Ubuntu 18.04 LTS;
- Servidor 2: este possui um IP acessível a partir do exterior, pelo que não é necessário fazer autenticação para conectar com este. Relativamente às características, este possui 1 CPU, 8 GB Ram, 20 GB disco e o sistema operativo é o Ubuntu.

No entanto, antes de escolher o servidor para o qual serão enviados os dados, é necessário averiguar se este tem capacidade para armazenar os dados enviados pelo *MB1000*, os quais incluem:

- 8 sinais analógicos por parte do veículo equipado com o caudalímetro e 7 por parte do outro, variáveis estas que são do tipo *float*;
- 8 sinais digitais por parte do veículo que possui o caudalímetro e 7 no que não possui, variáveis estas que, por apenas terem dois estados (ligado ou desligado), serão binárias e como tal apenas ocupam 1 *bit*;
- 2 variáveis do tipo *float* para o sinal de GPS (latitude e longitude) de cada um dos veículos;
- 1 variável do tipo *float* para o *timestamp* de cada um dos veículos.

No total, serão lidas $8 + 7 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 21$ variáveis do tipo *float* e $8 + 7 = 15$ variáveis do tipo *bit*. Uma vez que 1 *float* equivale a 32 *bits*, então $21 \cdot 32 + 15 \cdot 1 = 687$ *bits* adquiridos pelo *MB1000* a cada segundo, o que corresponde a $687 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 \approx 21.67$ Gb, o que equivale aproximadamente a 2.7 GB por ano, pelo que qualquer um dos servidores tem uma capacidade superior a este valor, podendo ser usado para o efeito.

6.3 Tratamento dos dados

Antes de se proceder ao início do trabalho de *data mining*, há certos pormenores relativos aos dados a analisar que deverão ser tidos em conta.

6.3.1 Sinais dos transdutores

Todos os transdutores colocados irão ler grandezas físicas que se encontram entre certos valores, e converter o valor lido dessas grandezas para um sinal de corrente de 4 – 20 mA. Como tal, para se poder saber qual o significado físico da corrente que é enviada por cada transdutor, será necessário saber as curvas dos transdutores.

Começando pelo transdutor de corrente, este irá ler a corrente que passa numa das fases do motor, a qual poderá ir dos 0 – 11.5 A e irá converter o valor da mesma para um sinal de 4 – 20 mA de acordo com a curva apresentada no gráfico da figura 6.5.

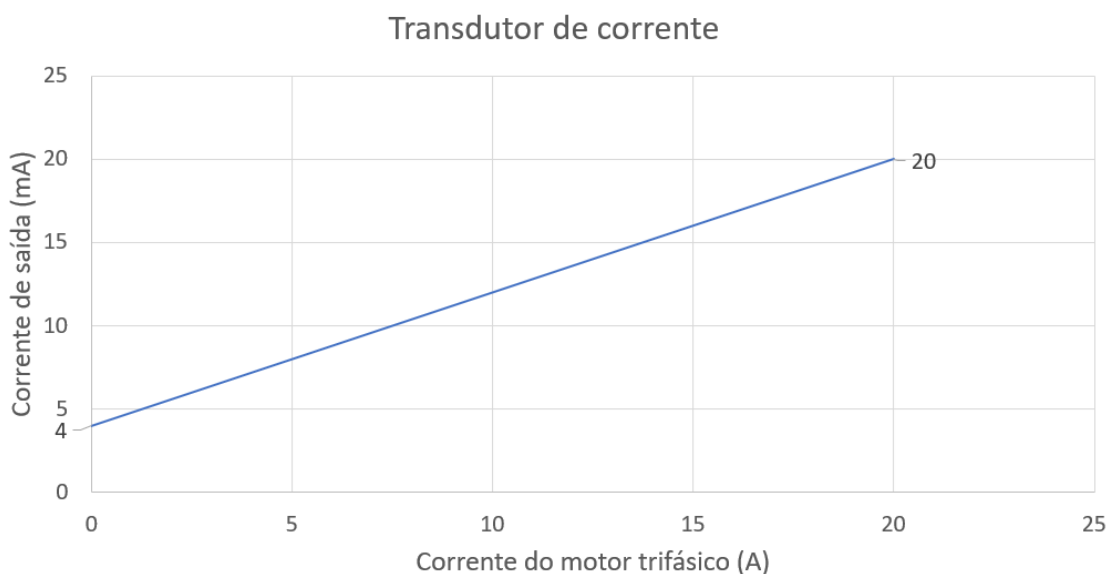


Figura 6.5: Corrente de saída do transdutor de corrente em função da corrente que passa no motor trifásico.

Passando para a leitura da temperatura do óleo, esta será feita recorrendo a um termopar do tipo K e a um conversor de sinal. Assim, a ponta de medição do termopar estará em contacto direto com o óleo quente e, dependendo da temperatura a que o óleo se encontrar, será gerada uma diferença de potencial entre os dois metais que constituem o termopar que, neste caso, por este ser do tipo K serão *cromel* e *alumel*. Esta diferença de potencial, uma vez que é muito pequena (na ordem dos milivolts), será convertida pelo conversor universal para um sinal de 4 – 20 mA. Uma vez que o conversor adquirido é programável utilizando um *smartphone* com o sistema operativo *Android* equipado com NFC (*Near Field Communications*) ou com um computador, usando o *software OKNFC-Soft*, então será possível programar o conversor de modo a criar a curva do sinal de saída em corrente em função da temperatura de entrada que melhor se ajuste ao sistema em causa.

Para este caso, visto que a temperatura do óleo nunca estará abaixo dos 50 °C, nem acima dos 120 °C, então esta será a gama dos valores de temperatura que o conjunto termopar + conversor estará preparado para ler e a curva do sinal de saída em corrente em função da temperatura do

óleo será igual à curva representada no gráfico da figura 6.6. A obtenção desta curva apenas é conseguida através da junção de dois gráficos: o gráfico da diferença de potencial exercida no termopar em função da temperatura do óleo, com o gráfico do sinal de saída em corrente (4 – 20 mA) em função da diferença de potencial criada no termopar.

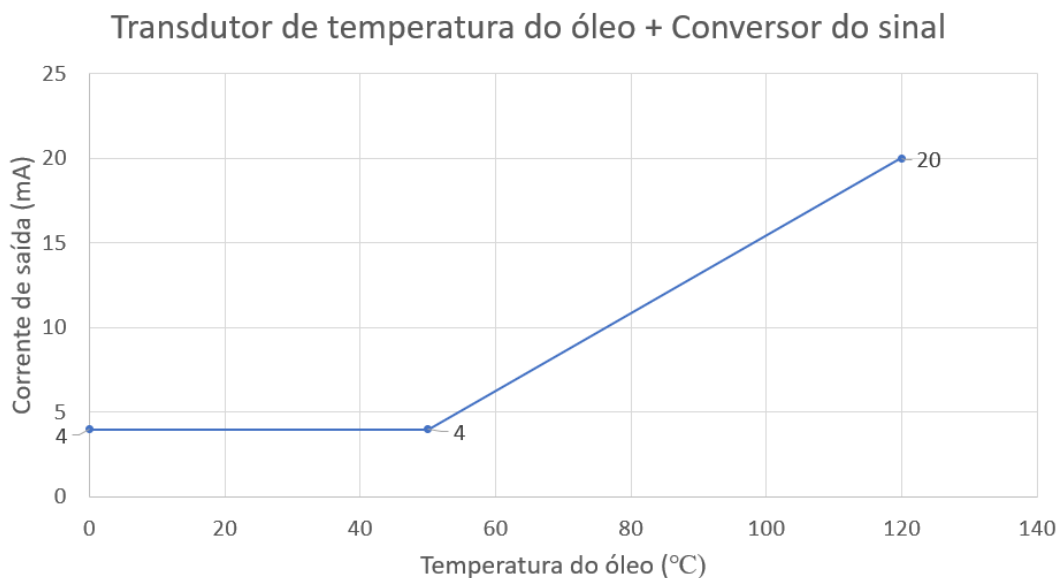


Figura 6.6: Corrente de saída do conversor em função da temperatura do óleo.

Similarmente ao que acontece com o transdutor de corrente, o transdutor de pressão também tem uma curva já definida que não pode ser alterada, pelo que a curva da corrente de saída para o *MB1000* em função da pressão relativa exercida neste transdutor pode ser observada na figura 6.6.

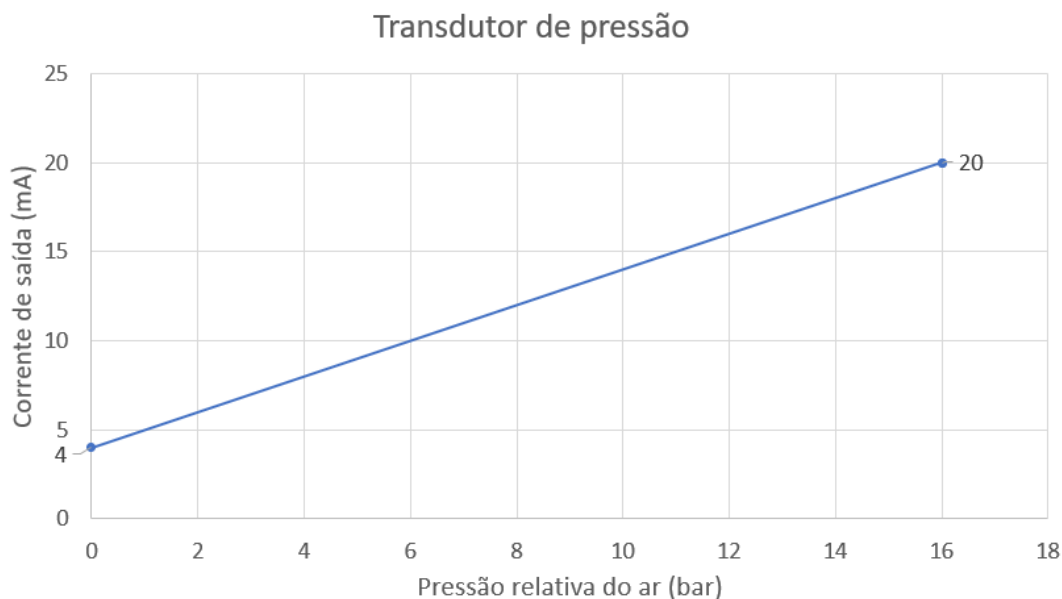


Figura 6.7: Corrente de saída do transdutor de pressão em função da pressão exercida sobre este.

Finalmente, na figura 6.8 apresenta-se a curva da corrente de saída de 4 – 20 mA em função do caudal volúmico que passa no caudalímetro. Um pormenor importante que terá que ser tido em conta quanto à utilização deste transdutor, é que apesar deste ler a pressão e a temperatura do ar, esta informação não passará para o *MB1000*, uma vez que, tal como já foi explicado na subsecção 5.3.8, não será possível disponibilizar uma entrada *Ethernet* para ligar a este transdutor. Deste modo, o caudalímetro apenas fornecerá informação relativa ao caudal volúmico.

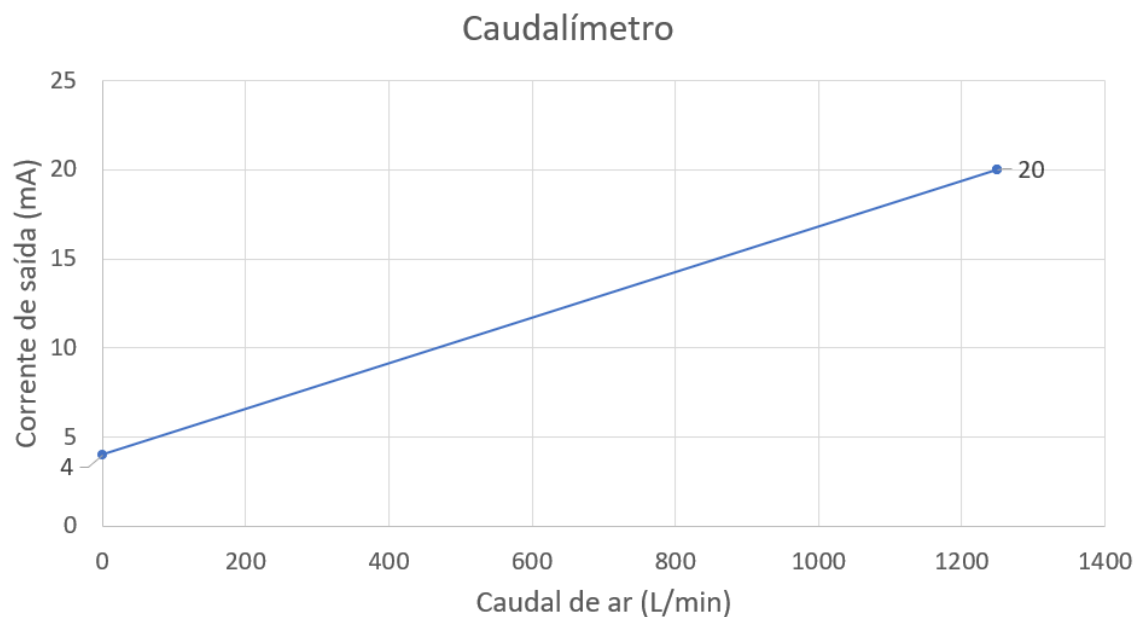


Figura 6.8: Corrente de saída do caudalímetro em função do caudal volúmico que passa por este.

Visto que o ar é um fluido compressível que se rege pela equação dos gases perfeitos, então a sua densidade varia com a sua pressão e temperatura, pelo que o valor do caudal volúmico que será enviado para o sistema de aquisição de dados será o volume que o ar teria nas condições estabelecidas pela norma ISO 2533 (International Organization for Standardization - ISO, 1975), ou seja, as condições de atmosfera padrão internacional.

Como tal, visto que o valor de temperatura e pressão nessas condições ($P = 1.075 \text{ bar} = 108.900 \text{ KPa}$ e $T = 19^\circ\text{C} = 292.15 \text{ K}$) são sabidos, é possível calcular o caudal mássico que passa no caudalímetro através da equação dos gases perfeitos (equação 6.1).

$$P \cdot \dot{V} = \dot{m} \cdot R \cdot T \quad (6.1)$$

O valor do caudal mássico que passa no caudalímetro é igual ao valor do caudal mássico que se calcula a partir desta equação aplicando o volume que é lido no caudalímetro e as condições de temperatura e pressão estabelecidas pela norma supracitada. Deste modo, sabe-se qual a quantidade de ar que está a sair da APU para os reservatórios, informação esta que será relevante para saber quanto ar comprimido está a ser produzido e a passar para os reservatórios.

6.3.2 Contexto de operação

Tal como referido na secção 3.3, uma análise RCM surge de uma comunhão entre o material circulante e o contexto de operação do mesmo. Como tal, ao analisar a distribuição das avarias dos últimos anos tentou-se relacionar a ocorrência de avarias com alguns dados da operação.

Em primeiro lugar, constatou-se que há locais onde o número de avarias relacionadas com a produção do ar comprimido é muito maior do que noutros. Face a estes locais, pode-se constatar que existem três características relacionadas com o local, que contribuem para o aumento do número de saídas de linha devido a avarias pneumáticas:

- **Inclinação da via:** Verificou-se que as paragens de metro que se encontram em locais de grande inclinação (estações de Santo Ovídeo e Fânzeres) são das que apresentam um maior número de avarias. Este facto acontece pois a grande inclinação do terreno obriga a um aumento na tração das rodas o que leva a um aumento da quantidade de ar comprimido consumido por parte do sistema de areeiros, que é usado para aumentar o atrito entre os carris e as rodas e, como tal, é consumido muito mais ar nestas zonas, principalmente em dias de chuva devido à humidade da via;
- **Entrada e saída de um grande número de passageiros:** O sistema de nivelamento do veículo obriga a que este esteja sempre à mesma altura independentemente do número de passageiros que se encontrar no veículo. Como tal, quando existem poucos passageiros no veículo, o peso deste é baixo, o que leva a que a pressão do ar que se encontra nas bolsas de ar da suspensão secundária seja baixa. No entanto, quando há um grande número de passageiros no veículo, o peso deste aumenta e, para que os ICM do veículo fiquem à altura normal, a pressão das bolsas de ar terá que aumentar. Deste modo, as oscilações no número de passageiros que se encontram no veículo influenciam muito a quantidade de ar comprimido que é consumido pelas bolsas da suspensão secundária. Por este motivo, não é surpreendente que locais de grande entrada e saída de passageiros como é o caso da Trindade, Estádio do Dragão, Senhora da Hora, General Torres e São Bento sejam dos que apresentam mais avarias;
- **Terminais:** Por ser mais conveniente, a maior parte dos desacoplamentos e acoplamentos entre veículos são feitos nos terminais das linhas. Visto que o engate automático consome muito ar comprimido durante este processo, muitas das paragens com mais avarias são terminais como é o caso do Ismai e, mais uma vez, Santo Ovídeo e Fânzeres (que são as duas paragens com mais avarias registadas).

Estes dados não indicam que estes locais são aqueles em que ocorrem mais avarias, mas sim aqueles onde são detetadas mais avarias, o que faz sentido porque grande parte das avarias que ocorrem durante a operação (fugas, por exemplo) não são imediatamente evidenciadas, uma vez que por vezes o compressor consegue produzir ar comprimido numa quantidade suficientemente elevada para colmatar a fuga, permitindo que a APU se mantenha a uma pressão superior a 7 bar. Quando os clientes do ar comprimido necessitarem de uma grande quantidade de ar comprimido, o

compressor já não será capaz de produzir ar comprimido suficiente para alimentar os consumidores e a fuga. Por outro lado, muitas vezes a elevada quantidade de consumo de ar comprimido nestas zonas pode levar a que a APU fique com uma pressão abaixo dos 7 bar mesmo que não haja nenhuma avaria pneumática, levando a que seja diagnosticada uma avaria num veículo em perfeitas condições, daí a importância da informação fornecida pelo GPS, para evitar a obtenção destes falsos positivos. O código de inteligência artificial que virá a ser criado para previsão de avarias, estará preparado para este aumento de consumo de ar comprimido que irá acontecer naturalmente neste locais específicos.

Outro dado da operação que influencia as avarias na APU, são as condições atmosféricas. Não é por acaso que ocorrem mais avarias nesta unidade durante o verão do que no resto do ano. Verificou-se que, apesar do número de viagens ser o mesmo, ocorrem mais avarias nesta unidade nos meses mais quentes do ano. Este fenómeno dá-se devido ao facto da subida da temperatura do ar aumentar a movimentação das partículas do ar e a pressão deste para o mesmo volume de ar. Esta instabilidade devido à grande movimentação das partículas do ar leva a que a ocorrência de fugas seja mais propícia, além de que influencia negativamente o processo de compressão do ar, uma vez as temperaturas altas do ar diminuem a taxa de compressão do ar.

Por estas razões, pretende-se monitorizar também as condições atmosféricas sob as quais os veículos operam. Inicialmente, tinha-se pensado em colocar um transdutor de temperatura e um de humidade atmosférica nos veículos. Com o desenrolar do projeto, concluiu-se que isto não seria exequível por ocupar duas entradas analógicas do *MB1000*, as quais poderiam ser usadas para monitorizar outras grandezas dentro da APU. Foi necessário arranjar outras alternativas de saber as condições atmosféricas a que o veículos está sujeito.

Deste modo, visto que se irá saber em que local está o veículo em tempo real, então irá recorrer-se às condições atmosféricas lidas em certos pontos onde estas são medidas na zona do grande Porto, e atribuir estes valores às zonas onde o veículo passa que sejam mais próximas desses pontos onde são medidas as condições atmosféricas. Para leitura das condições atmosféricas em tempo real serão usadas as pressões, temperaturas e humidades lidas no *website Dark Sky*, no qual podem ser vistas as condições atmosféricas de várias localidades na zona do norte de Portugal (e no resto do Mundo) tal como se verifica na figura 6.9.

Assim, distinguiram-se sete zonas diferentes da rede metropolitana do Porto e a cada uma delas considerou-se que as condições atmosféricas que se sentem nessa zona seriam iguais às condições atmosféricas lidas no *Dark Sky* para a localidade mais próxima desse local.

Deste modo, para a zona assinalada com a letra A na figura 6.10 admite-se que as condições atmosféricas são iguais às condições atmosféricas lidas no *Dark Sky* para a Póvoa de Varzim. Para a zona assinalada com a letra B, vai-se considerar que as condições são iguais às condições atmosféricas lidas na Lavra. Para a zona marcada com a letra C, as condições serão iguais às lidas na Maia. As condições ambiente de Matosinhos serão atribuídas à zona D. Para a zona E serão consideradas as condições da cidade do Porto. Para a zona F vai-se pressupor que as condições são iguais às de Gondomar e por último, as condições exercidas em Vilar do Paraíso serão atribuídas aos locais presentes na zona G.



Figura 6.9: Locais onde serão lidas as condições atmosféricas através do Dark Sky (2019).

Capítulo 7

Conclusões

De forma a projetar um sistema de aquisição de dados para a manutenção preditiva da unidade de produção de ar comprimido dos veículos Eurotram da Metro do Porto S.A. realizaram-se várias tarefas distintas.

Inicialmente fez-se um estudo do veículo, tendo como principal foco a sua unidade de produção de ar comprimido. Analisaram-se os documentos da Metro do Porto relativos ao funcionamento desta unidade e os catálogos de cada um dos principais componentes a fim de averiguar todos os modos de funcionamento da unidade e os percursos alternativos do ar e do óleo no sistema.

Seguidamente, foi feito um levantamento dos vários tipos de manutenção existentes e foi feita uma revisão bibliográfica de metodologias como FMEA, FMECA e RCM a fim de estabelecer o modo como iriam ser analisadas as falhas e avarias passíveis de ocorrer na unidade de produção de ar comprimido.

Assim, foi examinado o historial de falhas da APU nos últimos anos, assim como os relatórios das avarias que nesta ocorreram. Além disso, foram analisadas várias reparações a avarias que surgiram em veículos ao longo destes meses de trabalho. A partir daqui foram retiradas várias conclusões:

- Devido à grande velocidade com que as avarias têm de ser corrigidas nos veículos, a manutenção corretiva nem sempre é feita da maneira mais correta. Geralmente é feita uma análise empírica rápida do estado do sistema por parte dos técnicos alocados para o efeito e é substituído o componente que parece ser o causador da falha (normalmente é aquele através do qual se encontra uma fuga notória de ar comprimido). O problema surge muitas vezes quando não é substituído o componente correto, caso este que é muito normal acontecer quando ocorrem avarias na eletroválvula A4, que pilota a válvula de descarga do filtro separador ciclónico. Por vezes, devido a uma falha na estanquidade entre os canais desta eletroválvula, ocorre uma fuga que efetua o acionamento da válvula de descarga do filtro separador ciclónico de forma contínua, o que leva a que muitas vezes a válvula A5 (válvula de descarga do filtro separador ciclónico) seja substituída erroneamente, e posteriormente leva a que a eletroválvula A4 também seja substituída, uma vez que após a colocação de uma nova válvula A5, esta continua a drenar ar. Isto acontece pois é feita a substituição

do componente que apresenta as consequências da avaria e não daquele que é causador da mesma. Este modo de correção das avarias pode-se revelar muito problemático na correção de modos de falha ocultos que são evidenciados por falhas múltiplas, isto porque por vezes com a substituição do componente onde a falha é evidenciada os efeitos da falha podem deixar de ser evidenciados, no entanto a falha não é corrigida, mas sim os seus efeitos são anulados.

- No que toca à manutenção preventiva, algumas das substituições de componentes agendadas vêm introduzir falhas no sistema devido a avarias provocadas pela alta taxa de mortalidade infantil dos equipamentos.
- Por vezes fica mais barato (mesmo a longo prazo) corrigir as consequências de um problema, do que corrigir o problema em si. É o que acontece com a eletroválvula A4. Apesar de ser sabido que este é o componente mais problemático da APU e de existirem soluções para a suceder, esta substituição não é feita uma vez que teria que ser feito um redimensionamento do painel pneumático onde esta está montada, assim como de outros componentes da APU. Uma reestruturação desta unidade além de cara, poderia vir a introduzir novos modos de falha no sistema, pelo que para este caso corrigir as consequências das avarias é economicamente mais fiável do que corrigir o problema de raíz.

Posteriormente, foram definidas as grandezas que deveriam ser monitorizadas a fim de se poder prever as avarias na APU e criou-se o plano inicial de sensorização dos veículos e uma especificação para os equipamentos a adquirir.

Em seguida, iniciou-se a parte mais demorada e desafiante da dissertação: passar do projeto para a realidade. Nesta fase foram consultadas dezenas de diferentes fornecedores quer de sistemas de aquisição de dados, quer de equipamento industrial de medição. As restrições de orçamento, problemas dimensionais e as exigentes condições de operação sob as quais os sensores estariam sujeitos foram várias das barreiras que tiveram que ser ultrapassadas para o sucesso do projeto. Constatou-se que independentemente do plano inicial estabelecido, é sempre necessário fazer alterações neste uma vez que apenas serão adquiridos os equipamentos que existirem no mercado que o orçamento disponível permitir comprar e que poderem ser incorporados no ambiente de operação existente sem prejudicar o normal funcionamento deste. Como tal, dificilmente é possível atingir uma solução ótima, pelo que cada decisão apresenta vantagens e desvantagens logo, o objetivo passará sempre por criar a solução mais vantajosa para as condições segundo as quais o projeto se realiza. No final, num trabalho que passa por integrar componentes de diferentes fabricantes, acima de tudo, é fulcral que todos os componentes funcionem como um todo, pelo que foi de extrema importância verificar que o sinal emitido pelos transdutores e detetores era compatível com as gamas de valores que o sistema de aquisição de dados estava preparado para ler, garantir que havia uma fonte de tensão com potência suficiente para alimentar todos os novos equipamentos a introduzir na APU e assegurar que a avaria de nenhum dos novos equipamentos introduzidos não virá a afetar o normal funcionamento da APU.

Quanto à possibilidade de deteção de falhas a tempo de as corrigir antes que estas gerem uma avaria que obrigue o veículo a efetuar uma saída de linha, apenas poderá ser verificada através do trabalho de *Data Mining* que será iniciado após a montagem dos equipamentos comprados nos dois veículos a instrumentar, trabalho este que faz parte da segunda parte do projeto *FailStopper*.

7.1 Satisfação dos objetivos

Esta dissertação tinha como objetivo principal a criação do projeto de um sistema de aquisição de dados para a manutenção preditiva de uma unidade embarcada de produção de ar comprimido para os veículos Eurotram da Metro do Porto S.A., o qual foi cumprido e será até mesmo montado e testado nos dois veículos a instrumentar num futuro muito próximo.

No que toca a objetivos secundários, o projeto tinha um orçamento de 10 000 € e tinha um prazo de 6 meses. Além disso, definiu-se que a avaria dos equipamentos a instalar não poderia de forma alguma influenciar negativamente a normal operação da APU e estes teriam que ser o menos intrusivos possível para o sistema. Por último, estabeleceu-se que os equipamentos a montar não poderiam impedir os normal desenrolar dos trabalhos de manutenção que são feitos atualmente.

Assim, os prazos do projeto foram cumpridos, uma vez que a compra de todos os equipamentos a instalar e do serviço de montagem foram finalizados em final de Julho.

Quanto ao orçamento inicial, este foi ultrapassado. No entanto, durante o decorrer do projeto, face aos elevados custos que os equipamentos qualificados para trabalhar em ambiente ferroviário apresentavam, definiu-se que poderia ser feita uma adjudicação do orçamento inicial de modo a que este pudesse chegar aos 12 000 €. No final, o orçamento gasto ficou abaixo deste segundo valor.

O transdutor de caudal e o transdutor de pressão que vai monitorizar a eletroválvula A4, são os equipamentos a montar que se revelam mais intrusivos para o sistema, uma vez que a sua montagem requer a alteração de *pipping* em condutas. Mesmo assim, os modos de falha mais comuns destes transdutores não impedirão o normal funcionamento da APU, pelo que este objetivo também foi cumprido.

Finalmente, os trabalhos de manutenção que são feitos atualmente não serão impedidos, apenas haverá alguns pequenos procedimentos que sofrerão alterações. Um exemplo disso é o da colocação do manómetro que lê a pressão do ar no compressor quando se fazem os testes da APU, que passará a ser colocado no orifício TP1 em vez do TP2. Outra alteração será na drenagem do óleo do compressor, na qual antes de se desapertar o bujão de drenagem, será necessário desacoplar o transdutor de temperatura do óleo e posteriormente a peça que junta este ao referido bujão.

7.2 Trabalhos futuros

Neste momento o projeto encontra-se a aguardar a chegada de todos os equipamentos adquiridos. Assim que chegarem, será feita a montagem destes nas duas APUs dos veículos a instrumen-

tar, montagem esta que, tal como foi referido na secção 5.4, será realizada pela *EMR*. De modo a garantir que a montagem é realizada corretamente e segundo a especificação feita para o efeito, a Metro do Porto S.A. prolongou a minha colaboração de modo a que eu fique a supervisionar estes trabalhos e os posteriores testes que serão feitos aos dois veículos antes destes voltarem à linha para realizar a operação comercial.

Posteriormente, os dois veículos realizarão os trabalhos normais de operação comercial durante 18 meses para que seja feita a aquisição e envio de dados reais para o servidor do INESC TEC. Nessa fase será feito um trabalho especializado de *data mining* por parte do Gustavo Costa, doutorado em *data mining* e deteção de avarias e professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, o qual irá proceder à análise dos dados para criar códigos de inteligência artificial que possam detetar padrões de modo a prever as avarias da APU a tempo de serem tomadas ações corretivas antes que estas acarretem consequências para o cliente.

Finalizado este trabalho, será feita uma avaliação de tudo o que foi conseguido com o *FailStopper*. Caso o projeto se tenha revelado um sucesso no que toca à deteção de falhas na APU a tempo de que estas possam ser corrigidas sem afetar a operação comercial, então será feita uma seleção de quais são os sensores que são imprescindíveis para essa deteção de falhas e quais é que são dispensáveis. Será feita uma reavaliação de mercado para saber qual o orçamento necessário para adquirir os sensores considerados imprescindíveis, o sistema de aquisição e envio de dados e a montagem de tudo isto em toda a frota dos veículos da Metro do Porto. Na eventualidade de, a longo prazo, o preço da implementação, manutenção e correção das falhas evidenciadas pelo software de inteligência artificial se revelar igual ou inferior ao preço que surge dos gastos relativos às avarias na APU mais a correção da mesmas, então a sensorização será alargada a toda a frota de 72 Eurotrams, mudando o método de manutenção das APUs de corretiva + preventiva para preditiva.

Referências

- Afonso, L. (2016) *Proposta de alteração das atividades de manutenção a realizar à APU do Eurotram*. EMEF - Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário S.A.
- Bombardier. (2007) *Eurotram MP060*. Disponível em: http://www.strassenbahn-online.de/Betriebshof/LF100/Eurotram_Porto/index.html [Acedido a 15 de Março de 2019].
- British Standards Institution (2017) BS EN 50155:2017. *Railway Applications - Rolling Stock - Electronic Equipementing stock*. United Kingdom, BSI.
- Dark Sky. (2019) *Porto - Temperature - 2nd September 3a.m.*. Disponível em: <https://darksky.net/forecast/41.1611,-8.614/sil2/en> [Acedido a 2 de Setembro de 2019].
- Delair India. (2018) *Delair Desiccant Dryer Video*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hwFYmkDiF5Y> [Acedido a 17 de Abril de 2019].
- Freitas, N. (2019) *Maintenance Engineering: Reliability-centred Maintenance*. [Workshop] NomadTech, 7 de Março.
- IFM (2013) *KQ6001 - Sensor capacitivo*. IFM Eletronic.
- IFM (2018) *SD6500 - Medidor de ar comprimido*. IFM Eletronic.
- IFM (2015) *PT5414 - Transmissor de pressão*. IFM Eletronic.
- International Organization for Standardization - ISO (1975) ISO:2533:1975. *Standard Atmosphere*. Geneva Switzerland, ISO
- LEM (n.d.) *AC Current transducer AT-B420L*. LEM.
- Metro do Porto S.A. (2002a) *Catálogo de peças ilustrado*. Metro do Porto S.A.
- Metro do Porto S.A. (2002b) *Manual de instruções técnicas*. Metro do Porto S.A.
- Metro do Porto S.A. (2019) *Mapa de rede - Zonas*. Metro do Porto S.A.
- Moubray, J. (1997) *Reliability-centered Maintenance II*. 4ª Edição. Oxford, Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Mutual Consultants (2010) *Maintenance Myths, Mindsets and Mistakes*. Mutual Consultants.
- Nomad Tech (n.d.a) *Nomad Tech MB1000 – Dimensions*. Nomad Tech.
- Nomad Tech (n.d.b) *Nomad Tech Monitoring Box hardware - MB1000 series*. Nomad Tech.

- NORGREN - Fluid Controls (n.d.) *Microsol 15 mm*. NORGREN.
- Oliveira, J. L. (2015) *Developing a reliability program for maintenance and operation*. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- OSAKA (n.d.) *Convertidor Universal NFC*. OSAKA Solutions.
- Siqueira Campos (2019) *Análise do modo e efeitos de falha potencial - FMEA de Processo*. Siqueira Campos Associados.
- Tiwari, A. & Sahu, S. & Kumar, Y. & Tiwari, S. (2019) New way of cooling by desiccant cooling system. *International Journal of Agricultural Engineering*. 11 (Sp. Issue), 76-80. Disponível em http://www.researchjournal.co.in/upload/assignments/11_76-80.pdf. [Acedido a 22 de Abril de 2019].
- Viana, G. O. & Rosário, D. & Sobrinho, D. & Abreu, J. N. & Evaristo, R. M. (2017) Análise da confiabilidade de um turbogerador via dados experimentais de tempos de falha. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*. 2 (35), 5. Disponível em https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curva-da-banheira_fig1_319220908. [Acedido a 26 de Março de 2019].
- WABCO (n.d.a.) *Air dryer - Basic Training*. WABCO.
- WABCO (n.d.b.) *System Saver Twin Air Dryer - Maintenance Manual*. WABCO.
- WIKA (2017) *OEM compact pressure switch socket wrench mounting model PSM01*. WIKA.
- WIKA (2019) *Process thermocouple for additional thermowell or basic module models TC12-B, TC12-M*. WIKA.

Anexo A

Tabela FMECA da APU

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
1	Produzir ar comprimido, livre de óleo e água, com pressões entre os 8.2 bar e os 10.2 bar com um caudal de 280 L/min	A	Incapacidade total de comprimir o ar	1	Motor elétrico queima devido a um curto-circuito nos enrolamentos da bobina	Um curto-circuito no motor leva a um sobreaquecimento dos enrolamentos da bobina do motor que podem queimar o motor, levando a uma avaria que incapacita totalmente a atividade deste. Com a avaria, o motor não aciona o compressor, fazendo com que este deixe de comprimir ar. A incapacidade total da compressão do ar leva a uma diminuição da pressão do ar, o que irá originar uma saída de linha por o veículo não se encontrar em condições para circular	8	3	1	24
				2	Motor elétrico queima devido a uma falha elétrica nos conversores auxiliares que leva a que passe uma tensão no motor superior aos 380 V DC para os quais este foi dimensionado	A passagem de uma corrente superior àquela para a qual o motor foi dimensionado leva a um sobreaquecimento dos enrolamentos da bobina do motor que podem queimá-lo, levando a uma avaria que incapacita totalmente a atividade deste. Com a avaria do motor, o motor não aciona o compressor, fazendo com que este deixe de comprimir ar. A incapacidade total da compressão do ar leva a uma diminuição da pressão do ar, originando eventualmente uma saída de linha por o veículo não se encontrar em condições para circular	8	3	1	24

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				3	Contactor do motor elétrico falha fechado devido a desgaste	Contactor do motor elétrico não consegue transitar da posição de repouso para a posição ativa por ter encravado, não ligando o motor. Esta ocorrência faz com que o compressor não seja acionado, fazendo com que este deixe de comprimir ar totalmente, levando eventualmente a uma saída de linha	8	3	1	24
				4	Motor gripa devido a falta de óleo	A falta de óleo levará a um aumento do atrito entre as palhetas e as paredes do compressor, o que levará a uma sobrecarga do motor, podendo levar à gripagem deste, o que provocará a incapacidade total de compressão. A incapacidade total da compressão do ar leva a uma diminuição da pressão do ar, o que irá originar uma saída de linha por o veículo não se encontrar em condições para circular	8	1	1	8

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				5 Fuga de óleo no radiador devido a um mau aperto das tubagens do mesmo ou à rutura das suas condutas de alumínio, a qual ocorre por corrosão destas	Ocorrência de uma fuga de óleo para o exterior, o que vai fazer com que o compressor não seja devidamente lubrificado. Com isto haverá mais atrito a dificultar a rotação do eixo do compressor e do veio do motor que, além de poder gripar o compressor, pode levar a uma sobrecarga do motor, o que levará a um sobreaquecimento do motor e do pouco óleo que ainda existe no circuito. Com o sobreaquecimento do óleo o termostato fará com que o óleo passe mais vezes pelo radiador antes de atingir o reservatório (fazendo com que se perca ainda mais óleo pela fuga existente no radiador). Por outro lado, o sobreaquecimento do óleo (quando são atingidos 100 °C) fará com que o termostato informe a unidade de controlo eletrónico para desligar o motor, preservando-o. A paragem do motor irá levar a uma descida da pressão no sistema de ar comprimido e, eventualmente, a uma saída de linha	7	3	7	147

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				6 Fuga de óleo pelo visor de nível	Ocorrência de uma fuga de óleo para o exterior, o que vai fazer com que o compressor não seja devidamente lubrificado. Com isto haverá mais atrito a dificultar a rotação do eixo do compressor e do veio do motor que, além de poder gripar o compressor, pode levar a uma sobrecarga do motor, o que levará a um sobreaquecimento do motor e do pouco óleo que ainda existe no circuito. Por outro lado, o sobreaquecimento do óleo fará com que o termostato informe a unidade de controlo eletrónico para desligar o motor, preservando-o. A paragem do motor irá levar a uma descida da pressão no sistema de ar comprimido e, eventualmente, a uma saída de linha	7	4	7	196

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN	
				7	Saturação do filtro separador do óleo	A saturação do filtro separador do óleo fará com que o filtro seja incapaz de filtrar total, ou parcialmente o óleo, o que fará com que parte do óleo passe para o circuito juntamente com o ar. Isto terá várias consequências: Primeiro, o circuito do óleo perde óleo, o que vai ter todas as consequências de sobreaquecimento do motor referidas nas alíneas anteriores. Segundo, passa óleo para o sistema, que irá contaminar todos os componentes, desde o filtro separador ciclónico, até ao granulado das torres secadoras de ar, degradando a qualidade do ar (humidade e óleo). Basicamente todos estes componentes perderão as suas capacidades de secagem do ar (principalmente o granulado), mas isto não será detetado porque a pressão vai manter-se, sendo, como tal, uma falha oculta. Só se vai detetar esta falha no caso extremo do motor gripar por falta de óleo ou caso se dê a obstrução de um dos canais de passagem do ar, o que levará à incapacidade de produção de ar comprimido e consequentemente ao disparo da válvula LPS.	6	5	9	270

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				8 Entupimento da válvula de retenção do óleo (que faz a ligação entre o separador do óleo e o reservatório/radiador)	O entupimento da válvula de retenção do óleo impedirá o óleo de passar para o radiador/reservatório, passando juntamente com o ar para o resto do sistema. Isto vai ter consequências negativas: Primeiro, o circuito do óleo perde óleo, o que vai ter todas as consequências de sobreaquecimento do motor referidas na alínea anterior. Segundo, passa óleo para o sistema, que irá contaminar todos os componentes, desde o filtro separador ciclónico, até ao granulado das torres secadoras de ar, irá degradar a qualidade do ar (humidade e óleo). Basicamente todos estes componentes perderão as suas capacidades de secagem do ar (principalmente o granulado), mas isto não será detetado porque a pressão vai manter-se, sendo, como tal, uma falha oculta. Só se vai detetar esta falha no caso extremo do motor gripar por falta de óleo ou caso se dê a obstrução de um dos canais de passagem do ar, o que levará à incapacidade de produção de ar comprimido e consequentemente ao disparo da válvula LPS	6	3	9	162

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				9 Utilização de um lubrificante incorreto para a lubrificação do compressor	As consequências são imprevisíveis, no entanto prevê-se um funcionamento incorreto por parte do compressor. (esta falha não costuma ocorrer uma vez que a EMEF utiliza sempre o mesmo óleo que é o aconselhado pelo fabricante)	8	1	1	8
				10 Obstrução da entrada do ar no compressor	A obstrução da entrada de ar no compressor impedirá a entrada de ar e, como tal, obrigará o compressor a trabalhar permanentemente em vazio. Como tal, não haverá compressão do ar e a pressão baixará continuamente, provocando eventualmente uma saída de linha	8	1	1	8
				11 Eletroválvula A3 falha fechada por falha mecânica	Caso esta válvula falhe fechada não haverá entrada de ar na parte do compressor onde o ar é comprimido. Como tal, este irá operar em vazio continuamente, o que irá diminuir a pressão até ser necessário realizar uma saída de linha	8	2	1	16
				12 Eletroválvula A3 falha fechada devido a falha elétrica	Caso esta válvula falhe fechada não haverá entrada de ar na parte do compressor onde o ar é comprimido. Como tal, este irá operar em vazio continuamente, o que irá diminuir a pressão até ser necessário realizar uma saída de linha	8	2	1	16

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				13 MPG (pressostato de comando) não consegue detetar pressão inferior a 8.2 bar	Isto leva a que o pressostato de comando não informe a unidade de controlo eletrónico para ligar o compressor, fazendo com que a pressão no sistema vá diminuindo continuamente, podendo levar a uma saída de linha	8	5	2	80
		B	Impossibilidade de produzir o ar a uma pressão acima dos 8.2 bar	Válvula A4 falha aberta. Mais de 95 % das vezes que ocorre esta falha é devido a uma má vedação dos canais da válvula, fazendo com que esta esteja aberta em alturas que deveria estar fechada. Esta falha também pode ocorrer devido a uma falha elétrica ou deteção incorreta de um impulso elétrico	No caso da válvula DV falhar aberta, esta irá acionar a válvula de descarga H1 e a válvula de descarga das torres secadoras do ar A7 permanentemente, fazendo com que se esteja a perder ar permanentemente, diminuindo a pressão do sistema, eventualmente, até esta descer abaixo dos 7 bar, o que ditará que o veículo não está em condições de prosseguir marcha e deverá sair de linha	7	6	2	84

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				2 Válvula A5 falha aberta devido ao desgaste do anel tórico que aumenta a folga entre este e o corpo da válvula e o impossibilita esta de se manter na posição que permite à válvula ficar fechada, ou através de uma má vedação entre a entrada e a saída da válvula	No caso da válvula H1 falhar aberta, fazendo com que esta esteja a drenar ar permanentemente, e como tal a perder ar continuamente, diminuindo a pressão do sistema, eventualmente, até esta descer abaixo dos 7 bar, o que ditará que o veículo não está em condições de prosseguir marcha e deverá sair de linha	7	6	2	84

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				3	Ligações no painel pneumático estão mal apertadas (com folga) ou estão demasiado apertadas, fazendo com que o parafuso moa a ligação roscada ao painel, criando uma fuga	Isto gera fugas de ar no painel pneumático, o que irá diminuir a pressão de ar no sistema o que vai obrigar o compressor a trabalhar em carga mais vezes. Dependendo do diâmetro da fuga, poderá eventualmente gerar uma saída de linha	7	4	4	112
				4	Válvula A1 falha na posição de repouso (geralmente ocorre devido à vedação deficiente por parte de um anel tórico)	Neste caso a torre 2 (a da esquerda) estará constantemente a regenerar o granulado desumificador e nunca chegará a secar o ar. Com isto, esta torre estará sempre a drenar ar para o exterior, o que irá diminuir a pressão no sistema de ar comprimido	6	4	4	96
				5	Válvula A2 falha na posição contrária à de repouso	Neste caso a torre 1 (a da direita) estará constantemente a regenerar o granulado desumificador e nunca chegará a secar o ar. Com isto, esta torre estará sempre a drenar ar para o exterior, o que irá diminuir a pressão no sistema de ar comprimido	6	2	4	48

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN	
				6	Válvula A7 falha na posição contrária à de repouso	Nessta situação o ar presente no painel pneumático e nas torres secadoras de ar será libertado para o exterior, uma vez que esta válvula efetua a descarga das torres secadoras de ar. Além de que o ar presente no compressor não vai passar para as torres secadoras nem para a zona do controlo de pressão do ar	7	2	1	14
				7	Fuga de ar na união flexível entre o compressor e o filtro separador ciclónico	O ar comprimido escapa-se pela fuga, diminuindo a pressão do sistema, até levar, eventualmente a uma saída de linha	7	6	2	84
				8	Fuga num dos consumidores	O sistema consegue produzir ar comprimido no compressor, no entanto não consegue produzir em quantidade suficiente para vencer as fugas nos consumidores. No caso da fuga ser grande o suficiente para que o compressor não consiga vencer o ar perdido pela fuga mais o ar consumido nos consumidores, então a pressão irá descer até ficar abaixo dos 7 bar, o que indica que o veículo se encontra inoperável	7	4	4	112

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
		C	Impossibilidade de produzir o ar a uma pressão abaixo dos 10.2 bar	1 Eletroválvula A3 falha aberta	O compressor passará a trabalhar em contínuo permanentemente. Isto irá aumentar a pressão no sistema pneumático e irá não só sobrecarregar o compressor, como também obrigar a válvula de segurança a atuar várias vezes para drenar o ar quando a pressão no sistema for superior a 11 bar. Isto poderá ser danificar vários componentes do sistema, nomeadamente a válvula DV que não deve ser submetida a pressões acima dos 10.2 bar	6	4	4	96
				2 MPG não consegue detetar pressão superior a 10.2 bar	Em caso disto acontecer, o compressor estará continuamente a trabalhar em carga, estando sobrecarregado e levando a um maior gasto de energia. Neste caso o sistema tenderá a trabalhar a uma pressão a rondar os 11 bar, uma vez que a válvula de segurança vai drenar ar para o exterior no caso e a pressão no sistema subir acima dos 11 bar. Isto poderá ser danificar vários componentes do sistema, nomeadamente a válvula DV que não deve ser submetida a pressões acima dos 10.2 bar	6	2	4	48

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
		D	Impossibilidade de retirar a água do ar	1	Saturação do elemento granulado secador das torres secadoras do ar	A saturação do granulado das torres secadoras leva a uma diminuição na eficiência do processo de secagem do ar e, consequentemente, leva a um aumento da humidade no ar que será usado nos consumidores. Esta presença de água no sistema de ar comprimido leva à corrosão dos componentes e com isso há uma degradação dos mesmos, o que reduzirá o tempo de vida destes	5	5	10	250

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				2 Válvula A5 falha fechada	Caso a válvula H1 falhe fechada não haverá drenagem da água removida do ar no filtro separador ciclônico, o que eventualmente levará à saturação do filtro, diminuindo muito a sua capacidade de retirar a água do ar. Isto vai fazer com que o ar que vá para as torres secadoras do ar seja mais húmido do que o esperado, degradando o granulado desumificador destas. Além disso, o ar que vai passar para os reservatórios e para os consumidores vai ficando mais húmido. Isto é propício a um maior desgaste de todos os equipamentos, corrosão das condutas, podendo também em alguns casos levar ao entupimento de algum canal. Por outro lado, a ausência da descarga do filtro separador ciclônico vai levar a que a pressão no sistema esteja acima do normal, podendo fazer com que a válvula de segurança seja solicitada mais vezes	5	4	9	180
				3 Válvula A1 falha na posição inversa ao repouso	A torre 2 (esquerda) ficará sempre a secar o ar e nunca regenerará o granulado desumificador. Como tal, o ar que vai passar para os consumidores passará com uma humidade muito acima da humidade máxima admitida	5	2	9	90

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				4 Entupimento do orifício de entrada de pressão na válvula A4	O orifício de passagem do ar com pressão para a válvula DV tem um diâmetro muito reduzido, como tal, poderá ficar bloqueado facilmente. Nesse caso, a água retirada do ar no ciclo separador ciclónico não será drenada, uma vez que a DV não aciona a descarga da válvula H1, o que levará à saturação do filtro separador ciclónico, diminuindo a sua eficiência no processo de secagem do ar, o que fará com que o ar passe com mais humidade para a torre de secagem. Assim, a humidade do ar irá degradar o granulado saturado das torres secadoras de ar, o que levará à saturação destas também. Como tal, isto aumentará a degradação dos componentes da APU devido ao excesso de humidade presente no ar que leva a vários problemas, nomeadamente à corrosão destes.	5	4	9	180

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				5 Válvula A4 falha fechada (porque queimou)	Caso a válvula queime, ficará permanentemente na sua posição de repouso, que é fechada. Como tal, não irá acionar a válvula H1 e por isso não haverá drenagem da água removida do ar no filtro separador ciclónico, o que eventualmente levará à saturação do filtro, diminuindo muito a sua capacidade de retirar a água do ar. Isto vai fazer com que o ar que vai para as torres secadoras do ar seja mais húmido do que o esperado, degradando o granulado desumificador destas. Além disso, o ar que vai passar para os reservatórios e para os consumidores vai ficando mais húmido. Isto é propício a um maior desgaste de todos os equipamentos, corrosão das condutas, podendo também em alguns casos levar ao entupimento de algum canal. Por outro lado, a ausência da descarga do filtro separador ciclónico vai levar a que a pressão no sistema esteja acima do normal, podendo fazer com que a válvula de segurança seja solicitada mais vezes	5	4	9	180

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				6	Válvula A2 falha na posição de repouso	A torre 1 ficará sempre a secar o ar e nunca regenerará o granulado desumificador. Como tal, o ar que vai passar para os consumidores passará com uma humidade muito acima da humidade máxima admitida	5	2	9	90
				7	Válvula A6 falha na posição contrária ao repouso	Caso a válvula A6 falhe aberta a torre 2 estará sempre a regenerar o granulado desumificador, enquanto que a torre 1 vai estar permanentemente a secar o ar e nunca será regenerada. Assim, o granulado desumificador da torre 1 eventualmente ficará saturado, o que vai degradar o granulado e diminuir assim a eficiência do processo de secagem. Como tal, o ar que vai passar para o sistema será cada vez mais húmido	5	3	9	135
				8	Válvula A6 falha na posição de repouso	Caso a válvula A6 falhe fechada a torre 1 estará sempre a regenerar o granulado desumificador, enquanto que a torre 2 vai estar permanentemente a secar o ar e nunca será regenerada. Assim, o granulado desumificador da torre 2 eventualmente ficará saturado, o que vai degradar o granulado e diminuir assim a eficiência do processo de secagem. Como tal, o ar que vai passar para o sistema será cada vez mais húmido	5	3	9	135

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				9 Válvula A7 falha na posição de repouso	Eventualmente irá aumentar a humidade nas torres secadoras de ar, além de que dificultará a redução da pressão do sistema quando este atinge os 10.2 bar	5	4	9	180
				10 Saturação do filtro separador ciclónico	Aumenta a humidade presente no ar da APU e como tal provoca todas as consequências adjacentes deste facto	5	5	10	250
				11 Entupimento do filtro separador ciclónico	Além de aumentar a humidade presente no ar da APU e de provocar todas as consequências adjacentes deste facto, poderá eventualmente entupir o canal que liga o filtro separador ciclónico às torres secadoras de ar, o que irá impedir o ar de realizar o seu percurso na APU, diminuindo a pressão deste a jusante do filtro separador ciclónico, até que a válvula LPS dispare e o veículo seja considerado fora de condições de operação.	5	3	3	45

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
2	Sinalar a detecção de uma pressão inferior a 7 bar	A	Incacidade total de detectar a pressão inferior a 7 bar	1	Incapaz de ler a pressão à qual está sujeita	Esta falha só apresenta consequências caso o veículo apresente uma falha múltipla, uma vez que no processo de operação normal deste o veículo deverá manter-se acima dos 8.2 bar. No entanto caso aconteça uma falha que faça com que o veículo circule com uma pressão na APU inferior a 7 bar o veículo estará sujeito a vibrações demasiado elevadas e perigosas nos módulos A, C, E e G por poder não ter pressão suficiente para alimentar as bolsas da suspensão secundária presentes nos bogies do veículo. Além disso, não terá ar suficiente para alimentar o sistema de areeiros, como tal não poderá colocar areia na via para aumentar a tração entre as rodas e a via. Por outro lado, poderá não terá ar suficiente para alimentar o sistema de lubrificação de verdugos, aumentando o atrito dentro do bogie, principalmente nas curvas. Por último, poderá não ser possível realizar o acoplamento entre dois veículos por não haver ar suficiente no sistema do engate automático para o efeito.	5	3	3	140

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
		B	Incacidade total de sinalizar a pressão inferior a 7 bar.	1	Incapaz de comunicar à unidade eletrônica de que a pressão no sistema está inferior a 7 bar.	Esta falha só apresenta consequências caso o veículo apresente uma falha múltipla, uma vez que no processo de operação normal deste o veículo deverá manter-se acima dos 8.2 bar. No entanto caso aconteça uma falha que faça com que o veículo circule com uma pressão na APU inferior a 7 bar o veículo estará sujeito a vibrações demasiado elevadas e perigosas nos módulos A, C, E e G por poder não ter pressão suficiente para alimentar as bolsas da suspensão secundária presentes nos bogies do veículo. Além disso, não terá ar suficiente para alimentar o sistema de areeiros, como tal não poderá colocar areia na via para aumentar a tração entre as rodas e a via. Por outro lado, poderá não terá ar suficiente para alimentar o sistema de lubrificação de verdugos, aumentando o atrito dentro do bogie, principalmente nas curvas. Por último, poderá não ser possível realizar o acoplamento entre dois veículos por não haver ar suficiente no sistema do engate automático para o efeito.	5	2	7	70

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
		C	Incapaz de detetar a pressão inferior a 7.0 bar $\pm$ 0.5 bar.	1	Descalibração do pressostato de alarme por excesso.	Esta descalibração fará com que o pressostato dispare com um valor de pressão acima dos 7 bar. Neste caso, pode dar-se a situação do veículo reportar uma avaria quando esta não existe, pois devido à operação do veículo (à entrada e saída de pessoas no veículo, ou ao uso de ar comprimido no sistema de pneus, no lubrificador de verdugo e no engate automático) ocorrem descidas de pressão que podem não estar associadas a uma falha. Visto que a calibração é ajustável, então a válvula poderá ser calibrada e estará pronta para voltar a operar.	4	3	8	96

	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				2	Leitura incorreta da pressão do sistema devido ao entupimento do orifício de entrada do ar no pressostato de alarme por este apresentar um diâmetro muito reduzido que pode ser obstruído por pequenas partículas que entrem na APU.	Caso a entrada do pressostato esteja obstruída, este vai ler uma pressão inferior à do sistema, acionando o alarme quando o sistema não está em falha. Este acionamento leva a uma saída de linha que não seria necessária.	5	4	7	140
				3	Descalibração do pressostato de alarme por defeito.	Esta descalibração fará com que o pressostato dispare com um valor de pressão muito abaixo dos 7 bar. Neste caso, pode dar-se a situação do veículo já se encontrar com uma avaria que põe em causa a segurança do veículo, no entanto esta ainda não foi reportada por causa da descalibração da válvula. Visto que a calibração é ajustável, então a válvula poderá ser calibrada e estará pronta para voltar a operar.	4	3	8	96

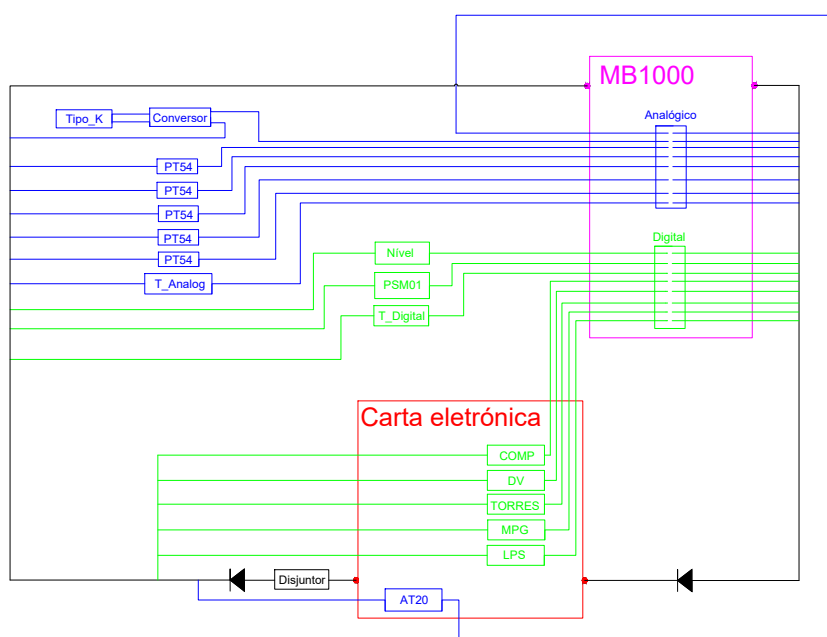
	Função		Falha funcional		Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
3	Drenagem do ar quando a pressão no sistema é superior a 11 bar	A	Incapaz de detetar a pressão acima dos 11 bar com uma precisão de ± 0.48 (11.48 bar como limite superior) e -0.78 bar (10.22 bar como limite inferior).	1	Incapacidade total da deteção da pressão à qual o sistema está sujeito.	A válvula de segurança não é acionada quando a pressão no sistema é superior a 11.48 bar. Esta falha só é detetada caso o sistema apresente uma falha múltipla que o leve a ter uma pressão superior a 11.48 bar. Neste caso, além de haver a degradação de toda a APU, podem ocorrer consequências catastróficas, como a rutura de uma das condutas.	9	1	8	72
				2	Descalibração da válvula de segurança por excesso	A válvula de segurança irá drenar o ar quando este se encontrar com uma pressão superior a 11.48 bar (no entanto iria drenar caso atingisse uma pressão um pouco maior a esta). Como tal, haverá uma pressão superior à esperada dentro da APU, podendo danificar as condutas de ar ou gerar fugas. Visto que a calibração vem feita de fábrica e não é ajustável, então o equipamento deve ser substituído.	5	2	8	80

	Função		Falha funcional	Modo de falha (causa)	Efeito da falha (consequências)	S	O	D	RPN
				3 Descalibração da válvula de segurança por defeito.	A válvula de segurança irá drenar o ar quando este se encontrar com uma pressão inferior a 10.22 bar. Como tal, irá drenar o ar precocemente, fazendo com que a pressão diminua sem ser necessário. Assim, a pressão irá atingir os 8.2 bar mais vezes, o que irá fazer com que o compressor seja solicitado a trabalhar em carga mais vezes, ficando sobrecarregado. Deste modo aumentam os gastos de energia e aumenta a possibilidade de surgirem falhas no compressor. Visto que a calibração vem feita de fábrica e não é ajustável, então o equipamento deve ser substituído.	4	2	8	64

Tabela A.1: Tabela FMECA da APU.

Anexo B

Esquema elétrico a montar na APU



Legenda:

Carta eletrônica: vermelho

Sistema de aquisição de dados (MB1000): roxo

Sinais digitais: verde

- COMP: sinal elétrico da eletroválvula de admissão de ar no compressor
- DV: sinal elétrico da eletroválvula A4
- TORRES: sinal elétrico da eletroválvula de comando das torres secadoras do ar
- MPG: sinal elétrico do pressostato de comando (8.2 a 10.2 bar)
- LPS: sinal elétrico do pressostato de pressão mínima (7 bar)
- T_Digital: Transdutor de caudal SD6500 (sinal digital do contador)
- Nível: Detetor capacitivo KQ6001 para detetar o nível do óleo
- PSM01: Pressostato PSM01

Sinais analógicos: azul

- Tipo_K: Termopar TC12-M do tipo K para ler a temperatura do óleo
- Conversor: Conversor universal que converte o sinal do transdutor de temperatura para um sinal 4-20 mA
- PT54: Transdutor de pressão PT5414
- T_Analog: Transdutor de caudal SD6500 (sinal analógico do caudal volúmico)
- AT20: Transdutor de corrente AT 20 B420L

Figura B.1: Esquema elétrico a montar na APU.

Anexo C

Fichas técnicas dos equipamentos adquiridos

AC Current transducer AT-B420L

Split-core transducer for the electronic measurement of AC waveform currents, with galvanic isolation between the primary circuit (power) and the secondary circuit (measurement). 4-20 mA current output proportional to the RMS value of the primary current.



$$I_{PN} = 5 \dots 150 \text{ A}$$



Electrical data

Primary nominal current rms I_{PN} (A.t.Rms)	Output current I_{OUT} (mA)	Type
5	4-20	AT 5 B420L
10	4-20	AT 10 B420L
20	4-20	AT 20 B420L
50	4-20	AT 50 B420L
100	4-20	AT 100 B420L
150	4-20	AT 150 B420L

R_L	Load resistance, with $V_C = +24 \text{ V DC}^{(1)}$	< 600	Ω
V_C	Supply voltage (loop-powered)	+ 20 .. 30	V DC
I_{SL}	Output current limitation	< 30	mA
$\hat{I}_P$	Overload capability - continuous	120	% of I_{PN}
	- 1 min	150	% of I_{PN}

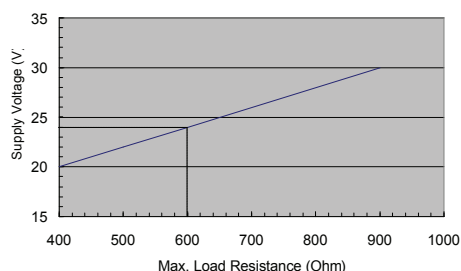
Performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$ (excluding offset)	< ± 1.5	% of I_{PN}
ϵ_L	Linearity error	< ± 0.5	% of I_{PN}
I_{OE}	Electrical offset current, $T_A = 25^\circ\text{C}$	4 $\pm$ 0.2	mA
t_r	Response time to 90% of I_{PN} step	< 100	ms
BW	Frequency bandwidth	50/60	Hz

General data

T_A	Ambient operating temperature	- 20 .. + 60	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	- 20 .. + 85	$^\circ\text{C}$
m	Mass	90	g
IPxx	Protection degree	IP40	

Note: ¹⁾Max. Load Resistance vs. Supply Voltage



Features

- RMS output
- Loop-powered 4-20mA current output
- Split-core type
- $\varnothing$ 16 mm sensing aperture for non-contact measurement
- Terminal output
- Isolated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- High isolation between primary and secondary circuits
- Compact case
- Cost-effective solution
- Easy installation

Applications

- **Automation and Supervision**
Current measurement for process regulation by distributed PLCs or remote control (e.g. SCADA software)
- **Safety and Condition Monitoring**
Load monitoring for protection systems and predictive maintenance (e.g. conveyers, pumps or HVAC motors)
- **Energy management**
Convenient connection to power consumption sub-meters

Application domain

- Energy and Automation

Current Transducer AT-B420L

Isolation characteristics

V_b	Rated isolation voltage rms ²⁾ with IEC 61010-1 standards and following conditions: - Reinforced isolation - Over voltage category CAT III - Pollution degree PD2 - Heterogeneous field	300	V
V_d	Rms voltage for AC isolation test ³⁾ , 50Hz, 1min.	3.5	kV
dCp	Creepage distance	6	mm
dCl	Clearance distance	6	mm
CTI	Comparative tracking index (Group I)	600	

Notes: ²⁾ If insulated cable is used for the primary circuit, the voltage category could be improved according to the primary cable insulation category (please refer to the cable manufacturer's indications)

³⁾ between primary (completely filling the hole) and secondary.

Safety and warning notes

In order to guarantee safe operation of the transducer and to be able to make proper use of all features and functions, please read these instructions thoroughly!

Safe operation can only be guaranteed if the transducer is used for the purpose it has been designed for and within the limits of the technical specifications.

Ensure you get up-to-date technical information that can be found in the latest associated datasheet under www.lem.com.



Caution! Risk of danger

Ignoring the warnings can lead to serious injury and/or cause damage!

The electric measuring transducer may only be installed and put into operation by qualified personnel that have received an appropriate training.

The corresponding national regulations shall be observed during installation and operation of the transducer and any electrical conductor.

The transducer shall be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements and in accordance with all the related systems and components manufacturers' operating instructions.



Caution! Risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module may carry hazardous live voltage (e.g. primary conductor, power supply).

The user shall ensure to take all measures necessary to protect against electrical shock.

The transducer is a built-in device containing conducting parts that shall not be accessible after installation.

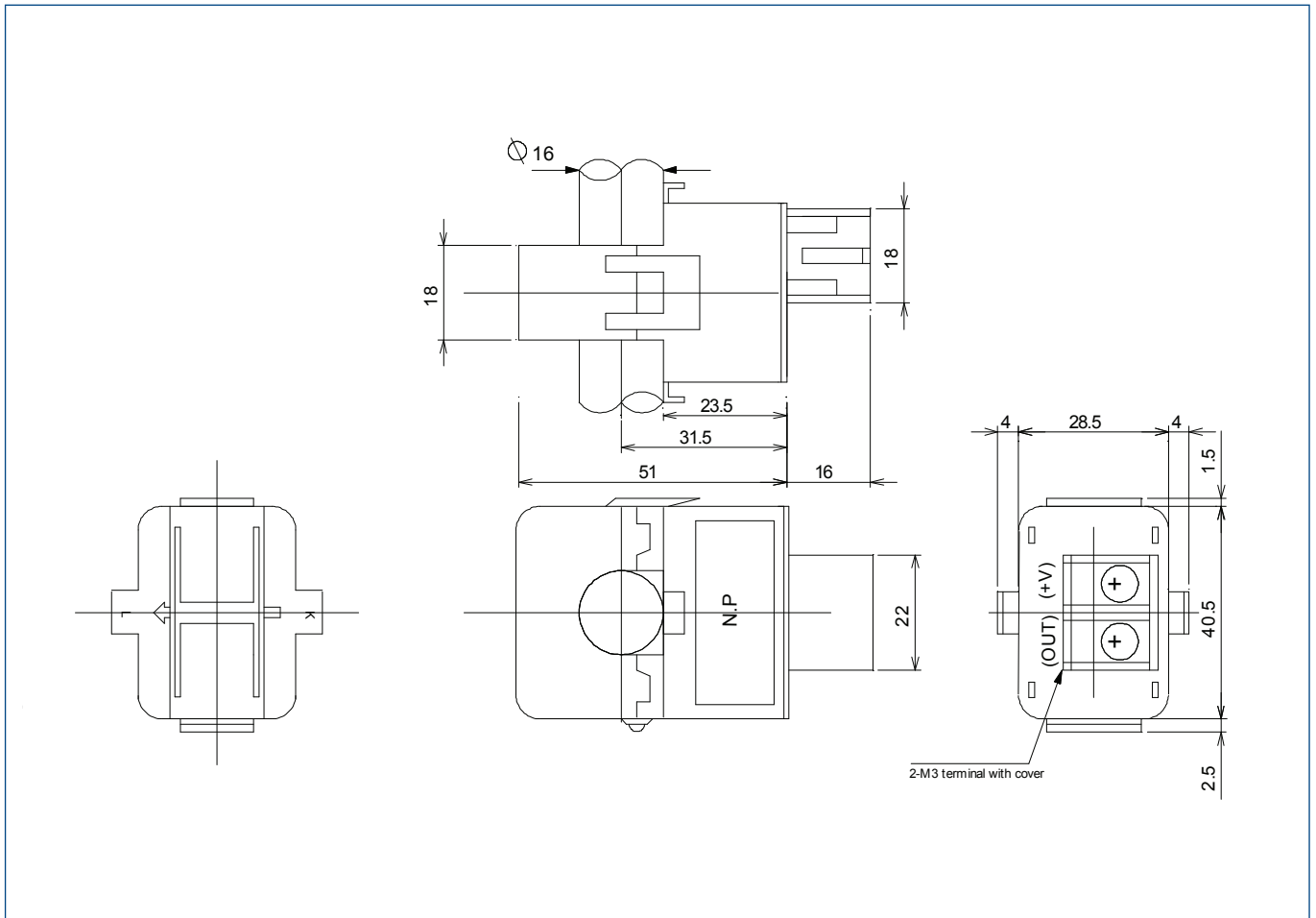
A protective enclosure or additional insulation barrier may be necessary.

The transducer shall not be put into operation if the jaw opening is open (split core version) or the installation is not completed.

Installation and maintenance shall be done with the main power supply disconnected except if there are no hazardous live parts in or in close proximity to the system and if the applicable national regulations are fully observed.

Safe and trouble-free operation of this transducer can only be guaranteed if transport, storage and installation are carried out correctly and operation and maintenance are carried out with care.

Dimensions AT-B420L (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Mechanical characteristics

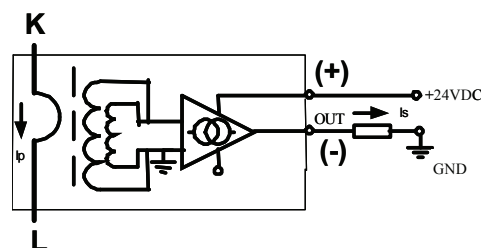
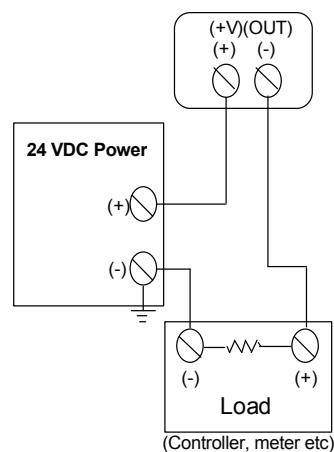
- General tolerance ± 1 mm
- Primary aperture $\varnothing 16$ mm
- Fastening Cable tie

Remarks

- ATTENTION: contact areas (air gap) must be kept clean (particle free) to ensure proper performance

Connections

- Wires up to 2 mm $\varnothing$



Process thermocouple

For additional thermowell or basic module

Models TC12-B, TC12-M

WIKA data sheet TE 65.17



for further approvals
see page 2

Applications

- Chemical industry
- Petrochemical industry
- Offshore
- Plant and vessel construction

Special features

- Sensor ranges from -40 ... +1,200 °C (-40 ... +2,192 °F)
- For many variants of temperature transmitters including field transmitter
- For mounting in all standard thermowell designs
- Spring-loaded measuring insert (replaceable)
- Explosion-protected versions

Description

Thermocouples in this series can be combined with a large number of thermowell designs. The replaceable, centrally spring-loaded measuring insert and its extended spring travel enable combination with the widest range of connection head designs.

A wide variety of possible combinations of sensor, connection head, insertion length, neck length, connection to thermowell etc. are available for the thermometers; suitable for any thermowell dimension and any application.

Operation without thermowell is only recommended in certain applications.

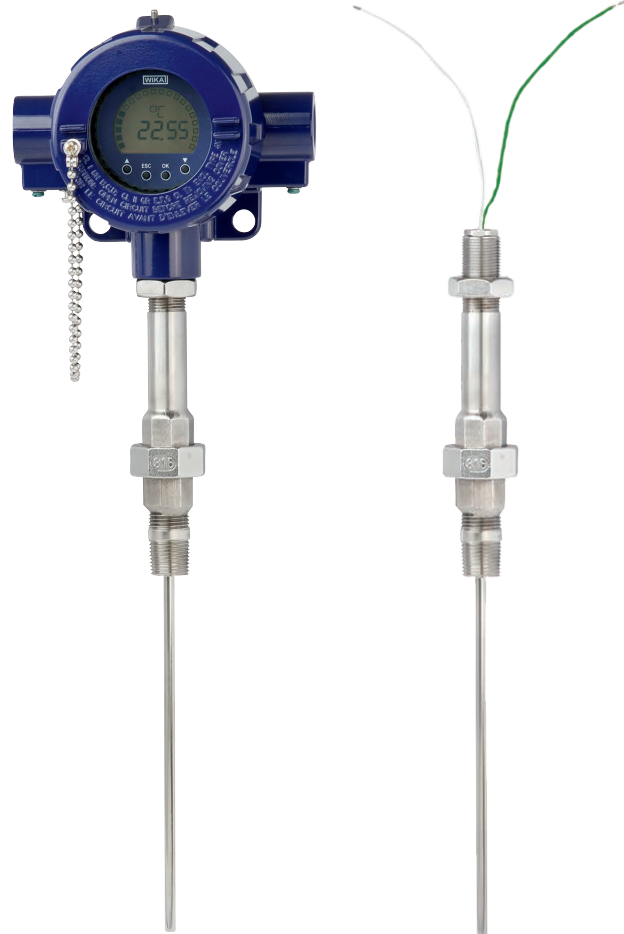


Fig. left: Process thermocouple model TC12-B

Fig. right: Basic module model TC12-M

Explosion protection (option)

For application in hazardous areas, corresponding versions are available.

Intrinsic safety

These instruments comply with the requirements of the ATEX directive or IECEx for gas.

Flameproof enclosure

These instruments comply with the requirements of the ATEX directive or IECEx for gas.

The permissible power P_{max} as well as the permissible ambient temperature for the respective category can be seen on the EC-type examination certificate or else the IECEx certificate or the operating instructions.

Built-in transmitters have their own EC-type examination certificate. The permissible ambient temperature ranges of the built-in transmitters can be taken from the corresponding transmitter approval.

Approvals (explosion protection, further approvals)

Logo	Description	Country
 	EU declaration of conformity EMC directive ¹⁾ EN 61326 emission (group 1, class B) and interference immunity (industrial application) ■ RoHS directive ■ ATEX directive (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [II 1G Ex ia IIC T1 ... T6 Ga] Zone 1 mounting to zone 0 gas [II 1/2G Ex ia IIC T1 ... T6 Ga/Gb] Zone 1 gas [II 2G Ex ia IIC T1 ... T6 Gb] - Ex d Zone 1 mounting to zone 0 gas [II 1/2D Ex db IIC T1 ... T6] Zone 1 gas [II 2G Ex db IIC T1 ... T6]	European Union
	IECEx (option) (in conjunction with ATEX) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [Ex ia IIC T1 ... T6 Ga] Zone 1 mounting to zone 0 gas [Ex ia IIC T1 ... T6 Ga/Gb] Zone 1 gas [Ex ia IIC T1 ... T6 Gb] - Ex d Zone 1 mounting to zone 0 gas [Ex db IIC T1 ... T6 Ga/Gb] Zone 1 gas [Ex db IIC T1 ... T6 Gb]	International
	EAC (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [0 Ex ia IIC T3/T4/T5/T6] Zone 1 gas [1 Ex ib IIC T3/T4/T5/T6] Zone 20 dust ²⁾ [DIP A20 Ta 65 °C/Ta 95 °C/Ta 125 °C] Zone 21 dust ²⁾ [DIP A21 Ta 65 °C/Ta 95 °C/Ta 125 °C] - Ex d Zone 1 gas [1 Ex d IIC T6 ... T1]	Eurasian Economic Community
	INMETRO (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [Ex ia IIC T3 ... T6 Ga] Zone 1 mounting to zone 0 gas [Ex ib IIC T3 ... T6 Ga/Gb] Zone 1 gas [Ex ib IIC T3 ... T6 Gb] Zone 20 dust ²⁾ [Ex ia IIC T125 ... T65 °C Da] Zone 21 mounting to zone 20 dust ²⁾ [Ex ib IIC T125 ... T65 °C Da/Db] Zone 21 dust ²⁾ [Ex ib IIC T125 ... T65 °C Db] - Ex d Zone 1 mounting to zone 0 gas [Ex d IIC T* Ga/Gb] Zone 1 gas [Ex d IIC T* Gb]	Brazil

Logo	Description	Country
	NEPSI (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [Ex ia IIC T1 ~ T6 Ga] Zone 1 mounting to zone 0 gas [Ex ia IIC T1 ~ T6 Ga/Gb] Zone 1 gas [Ex ia IIC T1 ~ T6 Gb]	China
	KCs - KOSHA (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [Ex ia IIC T4 ... T6] Zone 1 gas [Ex ib IIC T4 ... T6]	South Korea
-	PESO (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas [Ex ia IIC T1 ... T6 Ga] Zone 1 mounting to zone 0 gas [Ex ib IIC T3 ... T6 Ga/Gb] Zone 1 gas [Ex ib IIC T3 ... T6 Gb] - Ex d Zone 1 gas [Ex d IIC T1 ... T6 Gb]	India
	DNOP - MakNII (option) Hazardous areas - Ex i Zone 0 gas ²⁾ [II 1G Ex ia IIC T3 ... T6 Ga] Zone 1 mounting to zone 0 gas ²⁾ [II 1/2G Ex ia IIC T3 ... T6 Ga/Gb] Zone 1 gas ²⁾ [II 2G Ex ia IIC T3 ... T6 Gb] Zone 20 dust ²⁾ [II 1D Ex ia IIIC T125 ... T65 °C Da] Zone 21 mounting to zone 20 dust ²⁾ [II 1/2D Ex ia IIIC T125 ... T65 °C Da/Db] Zone 21 dust ²⁾ [II 2D Ex ia IIIC T125 ... T65 °C Db]	Ukraine
	GOST (option) Metrology, measurement technology	Russia
	KazInMetr (option) Metrology, measurement technology	Kazakhstan
-	MTSCHS (option) Permission for commissioning	Kazakhstan
	BelGIM (option) Metrology, measurement technology	Belarus
	Uzstandard (option) Metrology, measurement technology	Uzbekistan

Manufacturer's information and certificates

Logo	Description
	SIL 2 Functional safety

1) Only for built-in transmitter

2) Only for model TC12-B

Instruments marked with "ia" may also be used in areas only requiring instruments marked with "ib" or "ic".
If an instrument with "ia" marking has been used in an area with requirements in accordance with "ib" or "ic", it can no longer be operated in areas with requirements in accordance with "ia" afterwards.

Approvals and certificates, see website

Specifications

Output signal thermocouple	
Temperature range	Measuring range see page 5
Thermocouple per IEC 60584-1	Types K, J, E, N, T
Measuring point	■ Ungrounded welded (ungrounded) ■ Welded at the bottom (grounded)
Tolerance value of the measuring element ■ per IEC 60584-1 ■ per ASTM E230	Class 1 Class 2 Standard Special

Output signal 4 ... 20 mA, HART® protocol, FOUNDATION™ Fieldbus and PROFIBUS® PA				
Transmitter (selectable versions)	Model T16	Model T32	Model T53	Models TIF50, TIF52
Data sheet	TE 16.01	TE 32.04	TE 53.01	TE 62.01
Output				
■ 4 ... 20 mA	x	x		x
■ HART® protocol		x		x
■ FOUNDATION™ Fieldbus and PROFIBUS® PA			x	
Galvanic isolation	yes	yes	yes	yes

Measuring insert (replaceable)	
Material	Ni alloy: alloy 600, others on request
Diameter	Standard: 3 mm, 4.5 mm, 6 mm, 8 mm Option (on request): 1/8 inch (3.17 mm), 1/4 inch (6.35 mm), 3/8 inch (9.53 mm)
Spring travel	approx. 20 mm
Response time (in water, per EN 60751)	$t_{50} < 5 \text{ s}$ $t_{90} < 10 \text{ s}$ (measuring insert diameter 6 mm: The thermowell required for operation increases the response time dependent upon the actual parameters for the thermowell and the process.)

Neck tube	
Material	Stainless steel 1.4571, 316, 316L
Connection thread to the thermowell	■ G 1/2 B ■ G 3/4 B ■ 1/2 NPT ■ 3/4 NPT ■ M14 x 1.5 ■ M18 x 1.5 ■ M20 x 1.5 ■ M27 x 2
Connection thread to the head	■ M20 x 1.5 with counter nut ■ 1/2 NPT
Neck length	■ min. 150 mm, standard neck length ■ 200 mm ■ 250 mm other neck lengths on request

Ambient conditions	
Ambient and storage temperature	-60 ¹⁾ / -40 ... +80 °C
Ingress protection	IP66 per IEC/EN 60529 The specified ingress protection only applies for TC12-B with corresponding thermowell, connection head, cable gland and appropriate cable dimensions.
Vibration resistance	50 g, peak-to-peak

Use thermocouples with shielded cable, and ground the shield on at least one end of the lead.

For a correct determination of the overall measuring deviation, both sensor and transmitter measuring deviations have to be considered.

1) Special version on request (only available with selected approvals), other ambient and storage temperature on request

Sensor

Sensor types

Model	Operating temperatures per			
	IEC 60584-1		ASTM E230	
	Class 2	Class 1	Standard	Special
K	-40 ... +1,200 °C	-40 ... +1,000 °C	0 ... 1,260 °C	
J	-40 ... +750 °C	-40 ... +750 °C	0 ... 760 °C	
E	-40 ... +900 °C	-40 ... +800 °C	0 ... 870 °C	
N	-40 ... +1,200 °C	-40 ... +1,000 °C	0 ... 1,260 °C	
T	-40 ... +350 °C		0 ... 370 °C	

Sheath material and sheath diameter may limit the maximum operating temperature.

The actual operating temperature of the thermometers is limited both by the maximum permissible working temperature and the diameter of the thermocouple and the MI cable, as well as by the maximum permissible working temperature of the thermowell material.

For detailed specifications for thermocouples, see IEC 60584-1 or ASTM E230 and Technical information IN 00.23 at www.wika.com.

Tolerance value

For the tolerance value of thermocouples, a cold junction temperature of 0 °C has been taken as the basis.

Listed models are available both as single or dual thermocouples. The thermocouple will be delivered with an ungrounded measuring point, unless explicitly specified otherwise.

Measuring insert

The replaceable measuring insert is made of a vibration-resistant, sheathed measuring cable (MI cable). The measuring insert diameter should be approx. 1 mm smaller than the bore diameter of the thermowell. Gaps of more than 0.5 mm between thermowell and the measuring insert will have a negative effect on the heat transfer, and they will result in unfavourable response behaviour of the thermometer.

When fitting the measuring insert into a thermowell, it is very important to determine the correct insertion length (= thermowell length for bottom thicknesses of ≤ 5.5 mm). In order to ensure that the measuring insert is firmly pressed down onto the bottom of the thermowell, the insert must be spring-loaded (spring travel: 0 ... 20 mm).

Calculation of the measuring insert length in the event of replacement

Thread to connection head	Measuring insert length l_5
1/2 NPT	NL + 12 mm
M20 x 1.5	NL + 18 mm

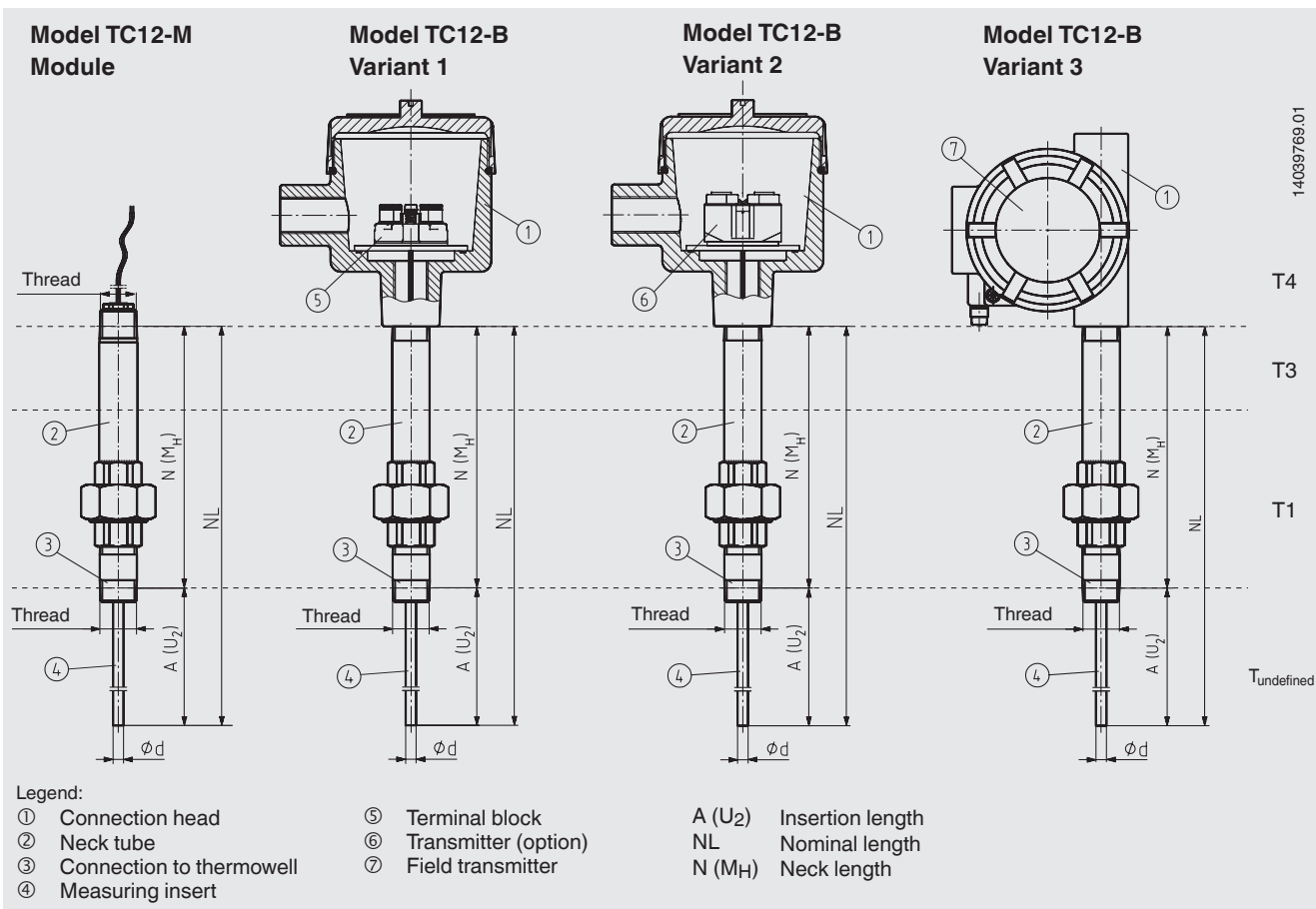
NL = Nominal length of the TC12-B or TC12-M

Neck tube

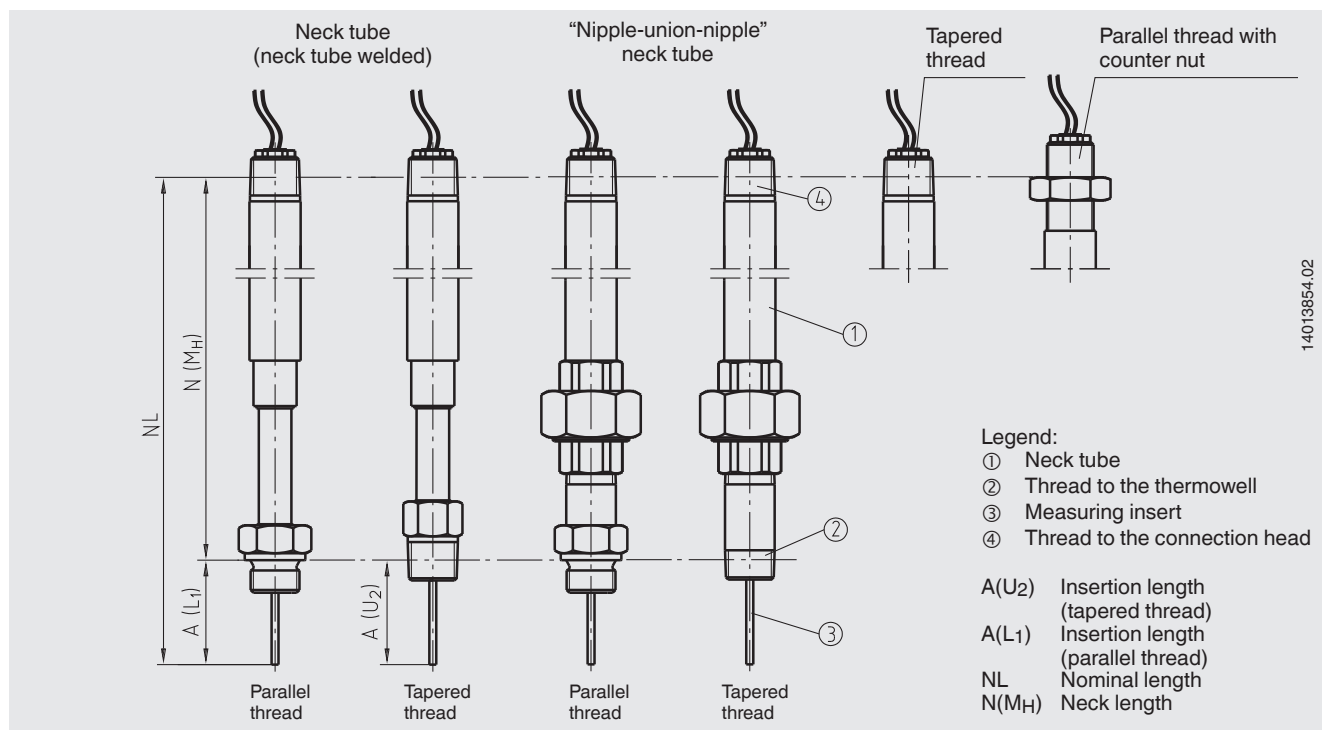
The neck tube is screwed into the connection head or the case. The neck length depends on the intended use. Usually an isolation is bridged by the neck tube. Also, in many cases, the neck tube serves as a cooling extension between the connection head and the medium, in order to protect any possible built-in transmitter from high medium temperatures.

In the Ex d version the flameproof joint is integrated in the neck tube.

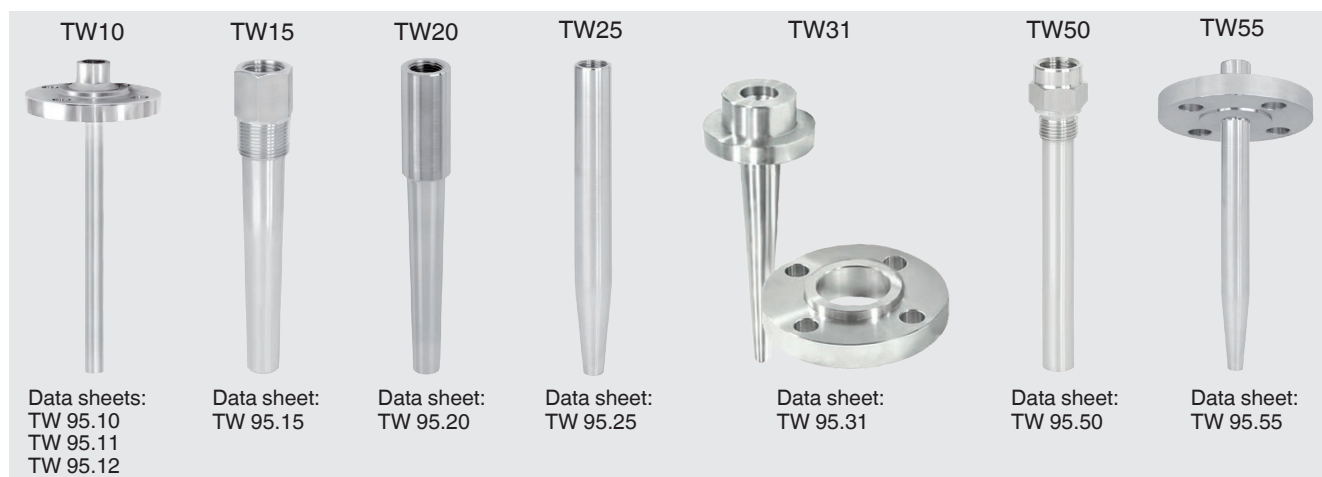
Components model TC12



Neck tube versions

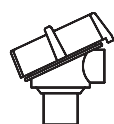


Thermowell selection

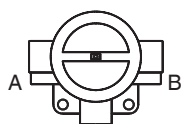


Special thermowells on request

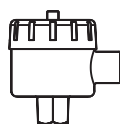
Connection head



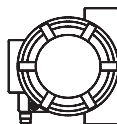
1/4000



5/6000



7/8000



other connection housings

Model	Material	Cable outlet	Ingress protection	Explosion protection	Cap	Surface
1/4000 F	Aluminium	½ NPT, ¾ NPT, M20 x 1.5	IP66 ¹⁾	Without, Ex i, Ex d	Screw-on lid	Blue, lacquered ²⁾
1/4000 S	Stainless steel	½ NPT, ¾ NPT, M20 x 1.5	IP66 ¹⁾	Without, Ex i, Ex d	Screw-on lid	Blank
5/6000	Aluminium	2 x ½ NPT, 2 x ¾ NPT, 2 x M20 x 1.5	IP66 ¹⁾	Without, Ex i, Ex d	Screw-on lid	Blue, lacquered ²⁾
7/8000 W	Aluminium	½ NPT, ¾ NPT, M20 x 1.5	IP66 ¹⁾	Without, Ex i, Ex d	Screw-on lid	Blue, lacquered ²⁾
7/8000 S	Stainless steel	½ NPT, ¾ NPT, M20 x 1.5	IP66 ¹⁾	Without, Ex i, Ex d	Screw-on lid	Blank

1) The specified ingress protection only applies for TC12-B with corresponding cable gland, appropriate cable dimensions and mounted thermowell.

2) RAL 5022

Field temperature transmitter with digital display (option)

Field temperature transmitters models TIF50, TIF52

As an alternative to the standard connection head the thermometer can be fitted with an optional model TIF50 or TIF52 field temperature transmitter.

The field temperature transmitter comprises a 4 ... 20 mA/ HART® protocol output and is equipped with an LCD indication module.

Model TIF50: HART® slave

Model TIF52: HART® master



Field temperature transmitters models TIF50, TIF52

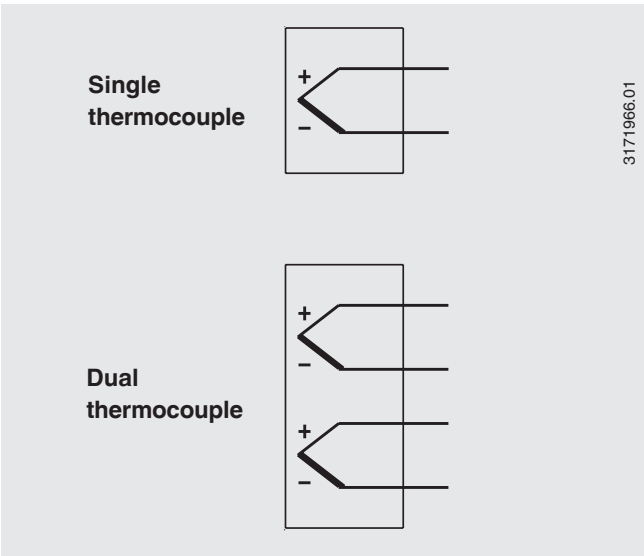
Transmitter (option)

As an option, WIKA transmitters can be installed in the TC12-B connection head.

Model	Description	Explosion protection	Data sheet
T16	Digital transmitter, PC configurable	Optional	TE 16.01
T32	Digital transmitter, HART® protocol	Optional	TE 32.04
T53	Digital transmitter FOUNDATION™ Fieldbus and PROFIBUS® PA	Standard	TE 53.01
TIF50	Digital field temperature transmitter, HART® protocol (slave)	Optional	TE 62.01
TIF52	Digital field temperature transmitter, HART® protocol (master)	Optional	TE 62.01

Other transmitters on request.

Electrical connection



Colour code of cable strands

Sensor type	IEC 60584-1		ASTM E230	
	Positive	Negative	Positive	Negative
K	Green	White	Yellow	Red
J	Black	White	White	Red
E	Violet	White	Violet	Red
N	Pink	White	Orange	Red
T	Brown	White	Blue	Red

For the electrical connections of built-in temperature transmitters see the corresponding data sheets or operating instructions.

Functional safety (option)

In safety-critical applications, the entire measuring chain must be taken into consideration in terms of the safety parameters. The SIL classification allows the assessment of the risk reduction reached by the safety installations.

Selected TC12 process thermocouples in combination with an appropriate temperature transmitter (e.g. model T32.1S) are suitable as sensors for safety functions up to SIL 2.

Matched thermowells allow easy dismounting of the measuring insert for calibration. The optimally matched measuring point consists of a thermowell, a TC12 thermometer and a T32.1S transmitter developed in accordance with IEC 61508. Thus, the measuring point provides maximum reliability and a long service life.

Certificates (option)

Certification type	Measurement accuracy	Material certificate
2.2 test report	x	x
3.1 inspection certificate	x	x
DKD/DAkkS calibration certificate	x	-

The different certifications can be combined with each other.

Approvals and certificates, see website

Ordering information

Model / Explosion protection / Ignition protection type / Sensor / Sensor specifications / Thermometer range of use / Measuring point / Connection housing / Thread size at cable outlet / Cable outlet / Transmitter / Neck tube version / Connection to case, connection head / Connection to thermowell / Neck tube length N(MH) / Insertion length A / Measuring insert / Options

© 04/2011 WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, all rights reserved.
The specifications given in this document represent the state of engineering at the time of publishing.
We reserve the right to make modifications to the specifications and materials.



CONVERTIDOR UNIVERSAL NFC



MANUAL DE USUARIO - V1
www.osakasolutions.com

INTRODUCCIÓN

! En el presente manual esta contenida la información necesaria para la correcta instalación e instrucción de utilización y mantenimiento del producto, se recomienda leerlo atentamente y de conservarlo.

Este documento es propiedad exclusiva de Osaka Solutions quien prohíbe cualquier reproducción y divulgación, total o parcial, sin expresa autorización. Osaka Solutions se reserva el derecho de cualquier modificación sin previo aviso.

Osaka Solutions, S.L. y sus representantes legales no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño a las personas, cosas o animales derivados de la violación, uso incorrecto o inadecuado.

! Con el fin de evitar que un funcionamiento irregular o mal funcionamiento pueda crear situaciones peligrosas o daños a personas o cosas o animales, se recuerda que la instalación debe cumplir y tener presente los sistemas de seguridad anexos, necesarios para garantizar dicha seguridad.

Eliminación



El aparato (o el producto) debe ser objeto de recogida separada en conformidad con las normativas locales vigentes en materia de desechos.

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO

Descripción general

El **Convertidor Universal NFC** es un transmisor de señal que acepta varios tipos de sensores en la entrada y los retransmite con un rango de valores programable.

En las señales de entrada se aceptan:

Pt100 Rango de medida: -200... +800°C,
conexión: 2, 3, 4 hilos, precisión: 0.1% fs ±10 µA;

Pt1000 Rango de medida: -200... +800°C,
conexión: 2 hilos, precisión: 0.1% fs ±10 µA;

Ni100 Rango de medida: -60... +180°C,
conexión: 2, 3, 4 hilos, precisión: 0.5% fs ±10 µA;

TC B Rango de medida: 40... +1820°C,
la precisión: 0.2% fs ±10 µA solo se puede obtener en el rango 400... 1800°C;

TC E Rango de medida: -200... +940°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

TC J Rango de medida: -200... +1200°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

TC K Rango de medida: -200... +1340°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

TC N Rango de medida: -200... +1280°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

TC R Rango de medida: -40... +1760°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

TC S Rango de medida: -40... +1760°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

TC T Rango de medida: -200... +400°C,
precisión: 0.2% fs ±10 µA;

mV Rango de medida: -10... +70 mV, precisión: 0.1% fs;

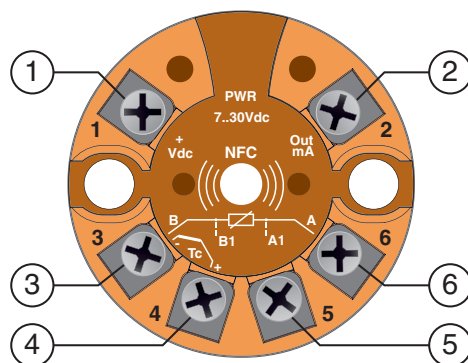
Potenciómetro 10... 400 Ω Conexión: 2, 3, 4 hilos;
precisión: 0.1% fs ±10 µA;

Potenciómetro 10... 4000 Ω Conexión: 2 hilos,
precisión: 0.1% fs ±10 µA.

En la salida, el **Convertidor Universal NFC** transmite señales de corriente (4...20 mA).

El **Convertidor Universal NFC** se puede programar utilizando un smartphone con sistema operativo Android equipado con **NFC** (Near Field Communications = Comunicación en proximidad) y la aplicación **OK-NFC** (disponible sin cargo en Play Store de Google) o a través de un **PC** con "Windows" conectando mediante el puerto USB el programador RF (**NFC-BASE**) y el software **OKNFC-Soft** (disponible sin cargo).

Descripción del instrumento

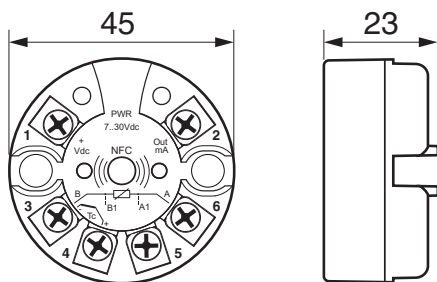


1, 2 Terminales de potencia y salida (transmisor de 2 hilos);

3, 4, 5, 6 Terminales de entrada.

ADVERTENCIAS PARA LA INSTALACIÓN

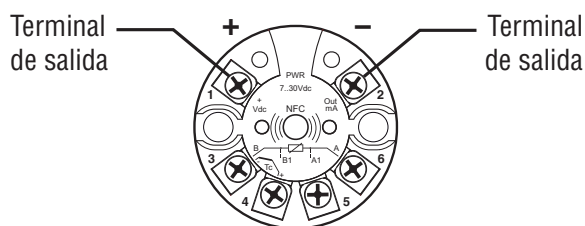
Dimensiones [mm]



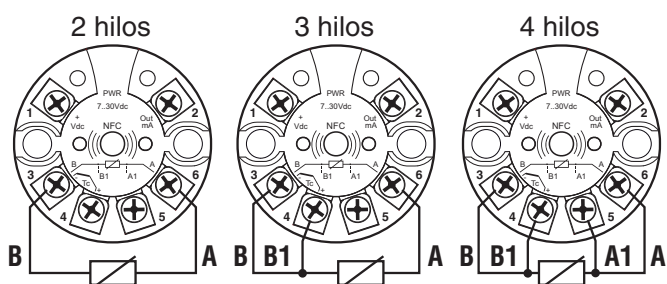
Conexiones electricas

Realizar las conexiones conectando solo un conductor por terminal de acuerdo a los diagramas que se muestran.

Salida

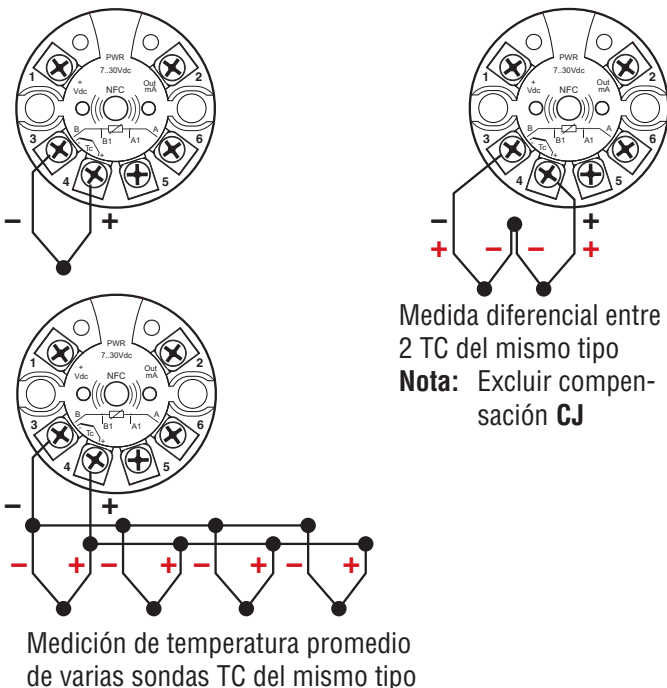


Sensores Pt100, Pt1000 y Ni100

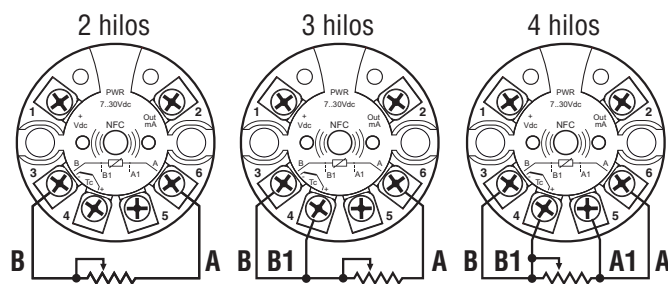


Nota: La sonda PT1000 solo se puede conectar en el modo 2 hilos.

Sensores TC K, S, R, J, T, N, B, E

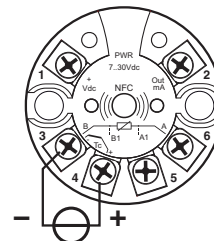


Potenciómetro 10...400 Ω y 10... 4000 Ω



Nota: El potenciómetro de 4000 Ω solo se puede conectar en modo 2 hilos.

Entrada de voltaje



ESPECIFICACIONES (@ 20 °C)

Especificaciones generales

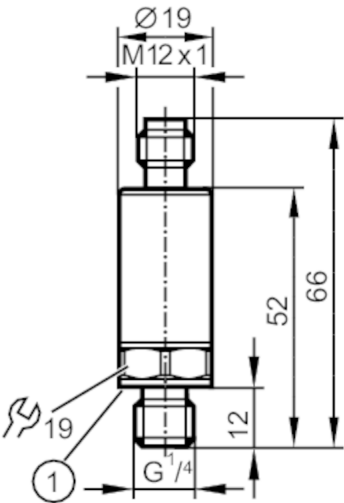
Corriente de excitación RTD: < 200 μ A;
 Máxima resistencia cable del RTD: 20 Ω por hilo;
 Precisión total de entrada TC: 0.2% fs $\pm$ 10 μ A;
 Precisión de compensación de la unión fría: $\pm$ 0.5 °C;
 Desvío térmico de la unión fría: 0.1 °C/°C;
 Alimentación: 7... 30 Vdc;
 Salida en corriente: 4... 20 mA (2 hilos);
 Resolución de salida: 2 mA;
 Valor de salida fuera de rango: +5 °C;
 Valor de salida de bajo rango: -5 °C;
 Valor de salida de falla: Seleccionable entre 21 mA, 3.8 mA o cualquier otro valor;
 Protección salida en corriente: 30 mA aprox.;
 Frecuencia: 50... 60 Hz;
 Precisión: Mejor del 0.2% f.s.;
 Desvío temperatura: < 100 ppm;
 Tiempo de muestreo: 300 ms;
 Tiempo de respuesta (10% de entrada, 90% de salida):
 - Sin filtro: 200 ms,
 - Filtro medio: 1 s,
 - Filtro fuerte: 4 s;
 Protección: IP 20;
 Conformidad: CE, EN 61326-1;
 Temperatura de trabajo: -40... +85 °C;
 Humedad: 30... 90% @ 40 °C (sin condensación);
 Temperatura de almacenaje: -40... +105 °C;
 Conexiones: Bornes a tornillo;
 Contenedor: PA66;
 Dimensiones: $\varnothing$ 45 mm, espesor 23 mm.

PT5414



Transmissor de pressão

PT-016-SEG14-A-ZVG/US/ IW



1 vedação



Campo de aplicação		
Aplicação		para aplicações industriais
Substâncias		fluidos líquidos e gasosos
Temperatura do fluido	[°C]	-40...90
Resistência à pressão	[bar]	40
Aviso da resistência à pressão		estático
Min. Berstdruck	[bar]	450
Resistência contra vácuo	[mbar]	-1000
Tipo de pressão		pressão relativa
Dados elétricos		
Tensão de operação	[V]	8,5...36 DC
Resistência de isolamento mín.	[MΩ]	100; (500 V DC)
Classe de proteção		III
Proteção contra inversão de polaridade		sim
Entradas/saídas		
Quantidade de entradas e saídas		Quantidade de saídas analógicas: 1



Transmissor de pressão

PT-016-SEG14-A-ZVG/US/ IW

Saídas		
Saídas totais	1	
Sinal de saída	sinal analógico	
Quantidade de saídas analógicas	1	
Corrente da saída analógica [mA]	4...20	
Carga máx. [Ω]	720; (Ub = 24 V; (Ub - 8,5 V) / 21,5 mA)	
Proteção contra curto-circuitos	sim	
Proteção contra sobrecarga	sim	
Faixa de medição / de ajuste		
Alcance de medição [bar]	0...16	
Precisão / desvios		
Repetibilidade [% de duração]	< ± 0,05; (nas variações de temperatura < 10K)	
Desvio de características [% de duração]	< ± 0,5; (incl. desvio de aparafusamento, erro de ponto zero e de tensão, não linearidade, histerese)	
Desvio de linearidade [% de duração]	< ± 0,1 (BFSL) / < ± 0,2 (LS)	
Desvio de histerese [% de duração]	< ± 0,2	
Estabilidade ao longo do tempo [% de duração]	< ± 0,1; (por 6 meses)	
Coeficiente de temperatura do ponto zero e amplitude [% de duração / 10 K]	< 0,1 (-25...90 °C) / < 0,2 (-40...-25 °C)	
Tempos de reação		
Tempo da resposta de passo saída analógica [ms]	1	
Condições ambientais		
Temperatura ambiente [°C]	-40...90	
Temperatura de armazenamento [°C]	-40...100	
Proteção	IP 67; IP 69K	
Certificações / testes		
CEM	DIN EN 61000-6-2	
	DIN EN 61000-6-3	
Resistência a choques	DIN EN 60068-2-27	50 g (11 ms)
Resistência a vibrações	DIN EN 60068-2-6	20 g (10...2000 Hz)
MTTF [anos]	784	
Certificado UL	Ta	-40...55 °C
	Enclosure type	Type 1
	tensão de alimentação	Limited Voltage/Current
	Número de aprovação UL	J027
	Número do arquivo UL	E174189
Diretiva de equipamentos sob pressão	Boas práticas de engenharia; pode ser utilizada para fluidos do grupo 2; substâncias do grupo de fluidos 1 sob encomenda	



Transmissor de pressão

PT-016-SEG14-A-ZVG/US/ IW

Dados mecânicos	
Peso [g]	59
Materiais	1.4542 (17-4 PH / 630); 1.4404 (aço inoxidável / 316L); PEI
Materiais em contato com o fluido	1.4542 (17-4 PH / 630)
Ciclos de pressão mín.	60 milhões; (a 1,2 da pressão nominal)
Máx. torque de aperto [Nm]	25...35; (torque recomendado; Depende da lubrificação, vedação e nível de pressão)
Conexão de processo	conexão da rosca G 1/4 rosca externa (DIN EN ISO 1179-2)
Vedação da conexão do processo	FKM (conforme DIN 3869)
Elemento de estrangulamento disponível	não (em breve)
Notas	
Notas	BFSL = Best Fit Straight Line (configuração do valor mínimo) LS = ajuste de ponto limite
Quantidade	1 peça

conexão elétrica

Conexão: 1 x M12

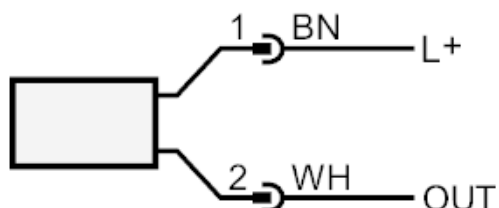




Transmissor de pressão

PT-016-SEG14-A-ZVG/US/ /W

Conexão



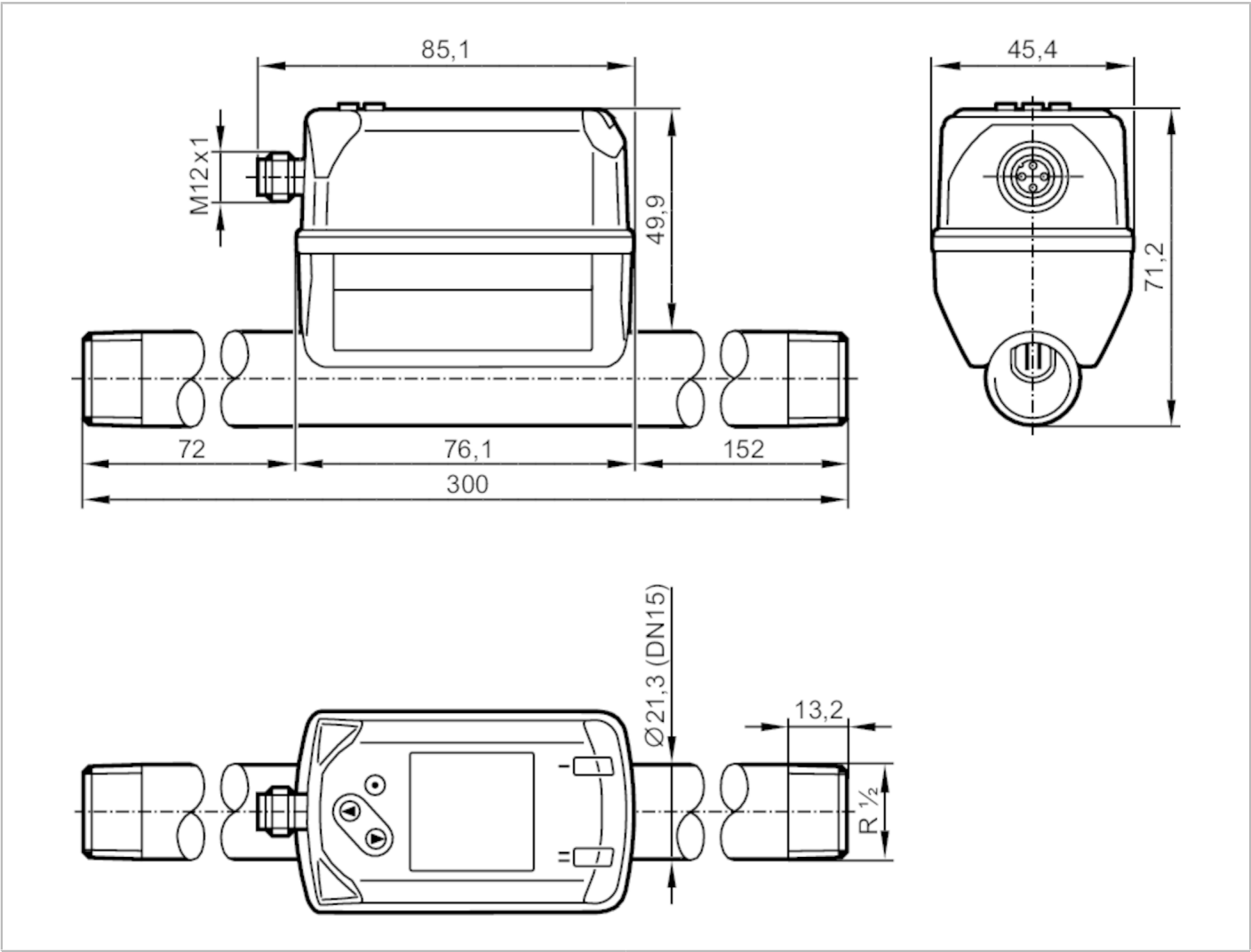
OUT	saída analógica A seguinte atribuição de pinos está disponível sob encomenda: Pin 1: L+, Pin 3: OUT Codificação de cores conforme DIN EN 60947-5-2 Cores dos condutores :
BN	castanho
WH	branco

SD6500



Medidor de ar comprimido

SDR12DGXFRKG/US-100



Campo de aplicação	
Aplicação	para aplicações industriais
Substâncias	Ar comprimido
Temperatura do fluído [°C]	-10...60
Min. Berstdruck [bar]	64
Resistência à pressão [bar]	16
Dados elétricos	
Tensão de operação [V]	18...30 DC; (conforme EN 50178 SELV/PELV)
Consumo de corrente [mA]	< 80
Classe de proteção	III
Proteção contra inversão de polaridade	sim
Retardo de prontidão [s]	1
Entradas/saídas	
Quantidade de entradas e saídas	Quantidade de saídas digitais: 2; Quantidade de saídas analógicas: 1



Medidor de ar comprimido

SDR12DGXFRKG/US-100

Entradas			
Entradas		reinício do contador	
Saídas			
Sinal de saída		sinal de comutação; sinal analógico; sinal de pulso; IO-Link; (configuráveis)	
Função elétrica		PNP/NPN	
Quantidade de saídas digitais		2	
Saída		abertura / fechamento; (parametrizável)	
Queda de tensão máx. da saída de comutação DC [V]		2,5	
Intensidade de corrente máxima constante da saída de comutação DC [mA]		150; (por saída)	
Quantidade de saídas analógicas		1	
Corrente da saída analógica [mA]		4...20; (de escala ajustável)	
Carga máx. [Ω]		500	
Saída de impulso		contador de quantidades consumidas	
Proteção contra curto-circuitos		sim	
Versão da proteção contra curto-circuito		por impulso	
Proteção contra sobrecarga		sim	
Faixa de medição / de ajuste			
Alcance de medição		4...1250 l/min	0,3...99,8 m/s 0,25...75 m³/h
Escala do display		0...1500 l/min	0...119,8 m/s 0...90 m³/h
Resolução		1 l/min	0,1 m/s 0,05 m³/h
Ponto de comutação SP		11...1250 l/min	0,9...99,8 m/s 0,65...74,97 m³/h
Ponto de comutação e retorno rP		5...1243 l/min	0,4...99,3 m/s 0,28...74,6 m³/h
Valor inicial do sinal analógico ASP		0...1000 l/min	0...79,8 m/s 0...60 m³/h
Valor final do sinal analógico AEP		250...1250 l/min	20...99,8 m/s 15...75 m³/h
Limite mínimo de corte LFC		1...13 l/min	0,1...1,1 m/s 0,09...0,8 m³/h
Em passos de		1 l/min	0,1 m/s 0,01 m³/h
Monitoramento de pressão			
Alcance de medição [bar]		-1...16	
Escala do display [bar]		-1...20	
Resolução [bar]		0,05	
Ponto de comutação SP [bar]		-0,92...16	
Ponto de comutação e retorno rP [bar]		-1...15,92	
Ponto inicial do sinal analógico [bar]		-1...12,8	
Ponto final do sinal analógico [bar]		2,2...16	
Em intervalos de [bar]		0,01	



Medidor de ar comprimido

SDR12DGXFRKG/US-100

Monitoramento da quantidade do fluxo volumétrico		
Alcance de medição	0...100000000 m³	0...353146667,2 scf
Escala do display	0...100000000 m³	0...353146667,2 scf
Ponto de comutação SP	0,001...10000000 m³	0,05...353146667,2 scf
Valor do impulso	0,001...10000000 m³	0,05...353146667,2 scf
Em intervalos de	0,0001 m³	0,005 scf
Comprimento do impulso [s]	0,002...2	
Controle de temperatura		
Alcance de medição	-10...60 °C	14...140 °F
Escala do display	-24...74 °C	-11,2...165,2 °F
Resolução	0,2 °C	0,5 °F
Ponto de comutação SP	-9,7...60 °C	14,6...140 °F
Ponto de comutação e retorno rP	-10...59,7 °C	14...139,4 °F
Ponto inicial do sinal analógico	-10...46 °C	14...114,8 °F
Ponto final do sinal analógico	4...60 °C	39,2...140 °F
Em intervalos de	0,1 °C	0,1 °F
Precisão / desvios		
Coeficiente de temperatura [1/K]	± 0,07 % MW	
Precisão (na área de medição)	class 141: ± (2 % MW + 0,5 % MEW); class 344: ± (6 % MW + 0,6 % MEW) ; air quality to ISO 8573-1:2010; na temperatura da substância 23 °C	
Repetibilidade	0,8 % MW + 0,2 % MEW	
Monitoramento de pressão		
Repetibilidade [% do valor final]	± 0,2	
Desvio de características [% do valor final]	< ± 0,5; (BFSL = Best Fit Straight Line (Definição do valor mínimo))	
Maior coeficiente de temperatura da escala [% MEW / 10 K]	± 0,15	
Maior Coeficiente de temperatura no ponto zero [% MEW / 10 K]	± 0,25	
Controle de temperatura		
Precisão [K]	± 0,5; (em fluxo de meios, nos limites da faixa de medição do fluxo)	
Tempos de reação		
Tempo de resposta [s]	0,1; (dAP = 0)	
Amortecimento da saída de comutação dAP [s]	0...5	
Monitoramento de pressão		
Tempo de resposta [s]	0,05	
Controle de temperatura		
Tempo dinâmico de respostas T05 / T09 [s]	T09 = 0,5	
Software / programação		
Possibilidades de ajuste dos parâmetros	histerese / janela; abertura / fechamento; saída de corrente/pulso; display rotativo/desligável; Unidade do display; totalizador	



Medidor de ar comprimido

SDR12DGXFRKG/US-100

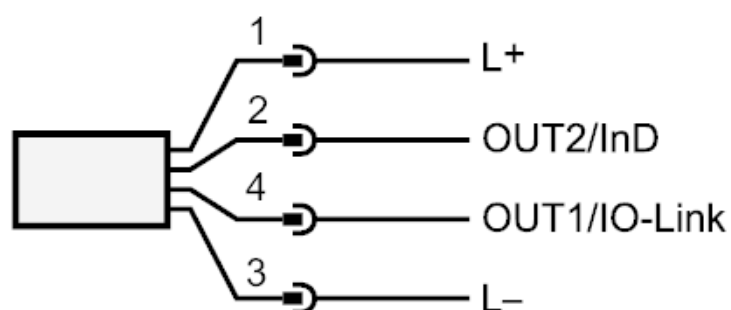
Interfaces		
Interface de comunicação	IO-Link	
Tipo de transferência	COM2 (38,4 kBaud)	
Revisão IO-Link	1.1	
SDCI-Padrão	IEC 61131-9 CDV	
Dispositivo IO-Link ID	862 d / 00 03 5d h	
Perfil	Digital Measuring Sensor (0x800A), Identification and Diagnosis (0x4000)	
Modo SIO	sim	
Classe de master port exigida	A	
Dados do processo analógicos	8	
Dados do processo binários	2	
Tempo mín. do ciclo do processo [ms]	7,2	
Condições ambientais		
Temperatura ambiente [°C]	0...60	
Temperatura de armazenamento [°C]	-20...85	
Umidade relativa do ar máx. [%]	90	
Proteção	IP 65; IP 67	
Certificações / testes		
CEM	DIN EN 60947-5-9	
Resistência a vibrações	DIN EN 68000-2-6	5 g (10...2000 Hz)
MTTF [anos]	183	
Diretiva de equipamentos sob pressão	Boas práticas de engenharia; pode ser utilizada para fluidos do grupo 2	
Dados mecânicos		
Peso [g]	728,5	
Materiais	PBT+PC-GF30; PPS GF40; 1.4301 (aço inoxidável / 304); 1.4305 (aço inoxidável / 303); 1.5523 (aço) galvanizado; 2.0401 (latão / CW614N); FKM	
Materiais em contato com o fluido	1.4301 (aço inoxidável / 304); 1.4305 (aço inoxidável / 303); FKM; cerâmica de vidro passivado; PPS GF40; Al2O3 (Cerâmica); acrylate	
Conexão de processo	conexão da rosca R 1/2 DN15	
Displays / elementos de operação		
Display	display colorido	1,44 "
	Resolução pixels	128 x 128
		2 x LED, amarelo
Notas		
Notas	MW = valor de medição	
	MEW = Valor final da faixa de medição	
	Faixas de medição, de indicação e de ajuste referem-se ao fluxo volumétrico padrão conforme DIN ISO 2533.	
	Para obter maiores informações sobre a instalação e operação, favor consulte o manual de operação.	
Quantidade	1 peça	
conexão elétrica		
Conexão: 1 x M12		

Medidor de ar comprimido

SDR12DGXFRKG/US-100



Conexão



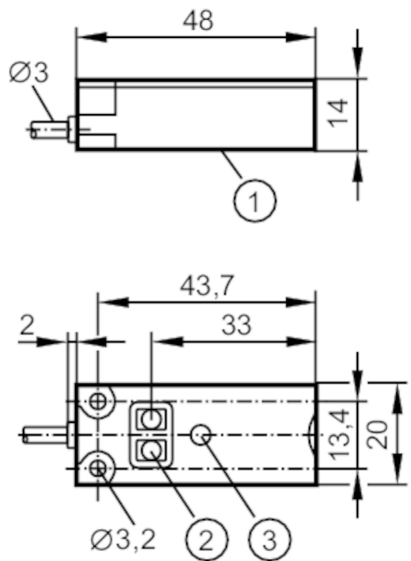
OUT1/IO-Link:	saída de comutação fluxo saída de comutação temperatura saída de comutação pressão saída de impulso contador de quantidade saída de sinal Contadores pré-programáveis
OUT2/InD:	saída de comutação fluxo saída de comutação temperatura saída de comutação pressão saída analógica fluxo saída analógica temperatura saída analógica pressão saída de sinal Contadores pré-programáveis saída de impulso contador de quantidade Entrada reinício do contador

KQ6001



Sensor capacitivo

KQ-3120NFAKG/2T

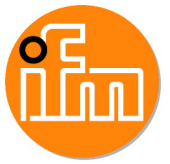


- 1 Face ativa
- 2 botões de programação
- 3 LED



Campo de aplicação		
Montagem		detecção pela parede do recipiente não metálica ou nos tubos de bypass
Substâncias		material a granel seco; líquidos
Dados elétricos		
Tensão de operação	[V]	10...30 DC
Consumo de corrente	[mA]	< 17
Classe de proteção		III
Proteção contra inversão de polaridade		sim
Saídas		
Função elétrica		PNP/NPN; (Detecção de carga automática PNP/NPN)
Saída		abertura / fechamento; (selecionável)
Queda de tensão máx. da saída de comutação DC	[V]	2,5
Intensidade de corrente máxima constante da saída de comutação DC	[mA]	100
Frequência de comutação DC	[Hz]	10
Proteção contra curto-circuitos		sim
Versão da proteção contra curto-circuito		por impulso
Proteção contra sobrecarga		sim

KQ6001



Sensor capacitivo

KQ-3120NFAKG/2T

Faixa de registro		
Alcance de detecção	[mm]	12
Distância real de comutação Sr	[mm]	12 ± 10 %
Precisão / desvios		
Histerese	[% de Sr]	1...15
Variação no ponto de comutação	[% de Sr]	-20...20
Interfaces		
Interface de comunicação		IO-Link
Tipo de transferência		COM1 (4,8 kBaud)
Revisão IO-Link		1.1
SDCI-Padrão		IEC 61131-9 CDV
Dispositivo IO-Link ID		371d / 000173h
Perfil		Smart Sensor
Modo SIO		sim
Tempo mín. do ciclo do processo	[ms]	100,8
Condições ambientais		
Temperatura ambiente	[°C]	-25...80
Proteção		IP 65; IP 67
Certificações / testes		
CEM	EN 61000-4-2 ESD	8 kV AD
	EN 61000-4-3 HF irradiado	10 V/m
	EN 61000-4-4 Burst	2 kV
	EN 61000-4-6 AF com fio	3 V
	EN 55011	classe B
Resistência a choques	EN 60068-2-27	30 g / 6 choques / 11 ms meio seno (x, y, z)
Resistência a vibrações	EN 60068-2-6	(10...55 Hz) / 1 mm de amplitude, duração da vibração 5 min., 30 min. cada eixo na ressonância ou 55 Hz
MTTF	[anos]	623
Dados mecânicos		
Peso	[g]	46,4
Carcaça		Retangular
Montagem		não embutido
Dimensões	[mm]	20 x 14 x 48
Materiais		carcaça: PBT reforçado com fibra de vidro; Botão: TPE-U; tampa: PC reforçado com fibra de vidro
Displays / elementos de operação		
Display	Estado de comutação	1 x LED, amarelo
Função Teach		sim
Bloqueio eletrônico		sim
Notas		
Quantidade		1 peça

KQ6001



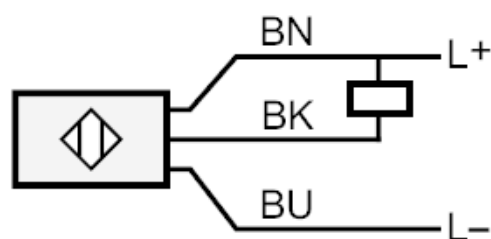
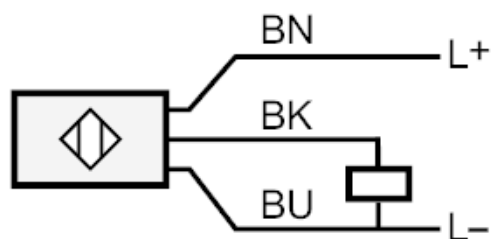
Sensor capacitivo

KQ-3120NFAKG/2T

conexão elétrica

cabo: 2 m, PVC; 3 x 0,14 mm²

Conexão



BK: OUT / IO-Link
Detecção de carga automática PNP/NPN
na utilização de uma carga ôhmica < 20 kΩ
Cores dos condutores :
BK = preto
BN = castanho
BU = azul

OEM compact pressure switch

Socket wrench mounting

Model PSM01

WIKA data sheet PV 34.81

Applications

- Hydraulics and mobile hydraulics
- Pneumatics
- Plastics injection moulding machines
- General machine building and plant construction
- Media: Compressed air, neutral and self-lubricating fluids, neutral gases

Special features

- High reproducibility
- Compact design
- Setting ranges -0.85 ... -0.15 bar and from 0.2 ... 2 bar to 40 ... 400 bar
- Long service life due to high-quality micro switch
- Socket wrench mounting



OEM compact pressure switch, socket wrench mounting, model PSM01

Description

Model PSM01 screw-in pressure switches in a diaphragm or piston variant open or close a circuit, depending on whether the pressure is dropping or rising. An adjustment screw enables easy and convenient on-site setting of the required switch point. Optionally, WIKA offers its customers the factory setting of the switch point.

The model PSM01 pressure switch is suitable for applications where compressed air, neutral and self-lubricating fluids as well as neutral gases are used.

The high reproducibility of the switch point of $\pm 2\%$ and the optional socket wrench mounting make this switch interesting for both OEM and small customers.

Standard version

Case

Steel, galvanised

Reproducibility

±2 % of full scale value

Permissible temperature

Ambient: -20 ... +80 °C

Medium: -20 ... +80 °C

Process connection

Steel, galvanised

G 1/8, G 1/4, 1/8 NPT, 1/4 NPT, R 1/8 or M10 x 1

Measuring element

Diaphragm or piston with compression spring

Sealing

Diaphragm: NBR or EPDM

Piston: PTFE (dynamic) and NBR, EPDM or Viton® (static)

Viton® fluoroelastomer is a registered trademark of DuPont Performance Elastomers.

Switch contacts

High-quality snap-action switch, self-cleaning

Switching function

Selectable: Normally open, normally closed, change-over contact

Electrical rating

Current utilization ¹⁾	Voltage, Current	
Resistive load AC-12, DC 12	AC 48 V, 2A	DC 24 V, 2A
Inductive load AC-14, DC 14	AC 48 V, 2A	DC 24 V, 1A

1) per DIN EN 60947-1

Electrical connection

Blade terminal FASTON 3 x 6.3 x 0.8

Switching frequency

max. 100/min

Service life

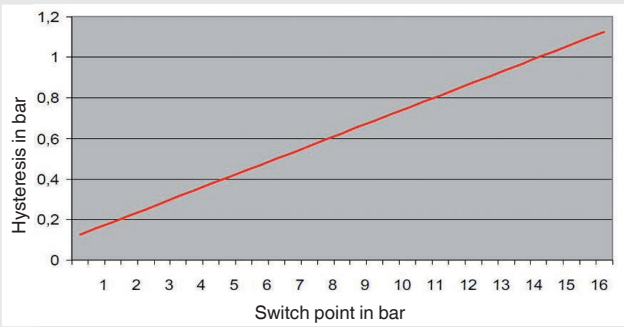
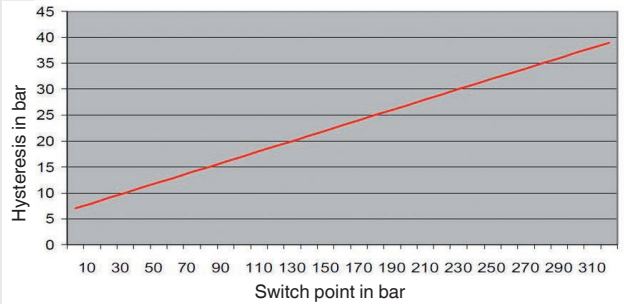
> 10⁶ switching cycles

Ingress protection

IP00 (IP67 with M 12 x1 ²⁾, Deutsch DT04-2P ²⁾ or cable)

2) The stated ingress protection (per IEC/EN 60529) only applies when plugged in using mating connectors that have the appropriate ingress protection.

Setting ranges, max. working pressure, measuring principle, hysteresis

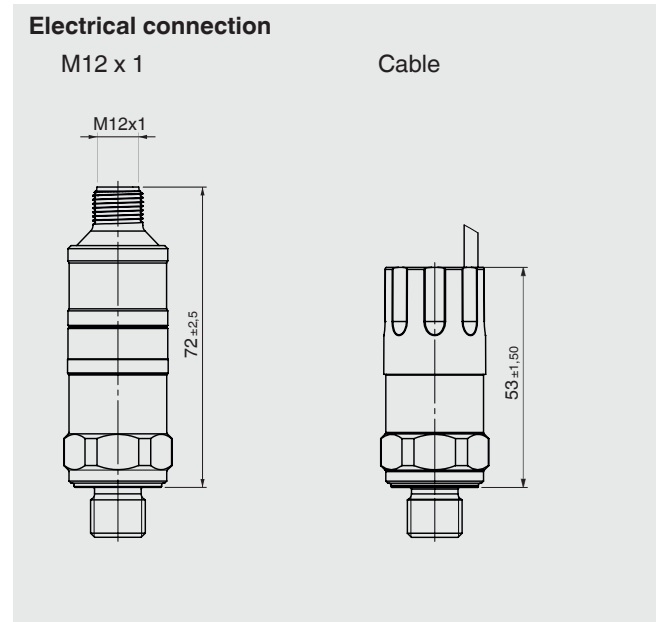
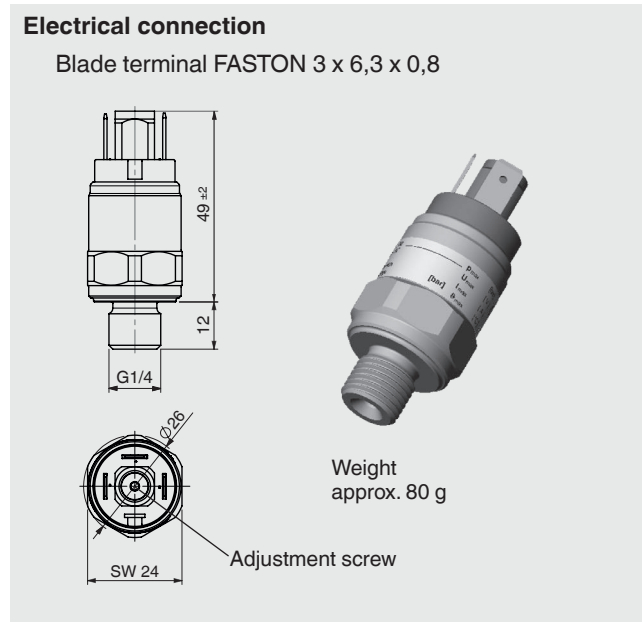
Setting range in bar	Max. working pressure in bar	Measuring principle	Hysteresis
0,2 ... 2	60	Diaphragm	 Example: At a switch point of 3 bar the hysteresis is 0.3 bar.
0,5 ... 8			
1 ... 16			
10 ... 30	350	Piston	 Example: At a switch point of 100 bar the hysteresis is 18 bar.
10 ... 80			
10 ... 160			
20 ... 250			
30 ... 320			
40 ... 400	420		

Options

- Factory setting of the switch point
- Case and process connection from stainless steel
- Other materials on request
- Electrical connection M12 x 1, Deutsch DT04-2P or cable
- Permissible ambient and medium temperature
-30 ... +100 °C

Dimensions in mm

Standard version



Ordering information

Model / Setting range / Switching function / Process connection / Sealing / Electrical connection / Options

© 2013 WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, all rights reserved.
The specifications given in this document represent the state of engineering at the time of publishing.
We reserve the right to make modifications to the specifications and materials.



Main Features and Overall description

- Runs software to collect and distribute data from multiple sub systems of the train
- Multiple connection ports
- Quick view of operation status by LED's
- GPS incorporated
- Industrial grade components
- Rugged & Fanless
- Maintenance free
- Railways compliant
- Remotely configurable and updatable
- Box operational status checked remotely
- 5 year warranty



MB1000

The Nomad Tech Monitoring Box unit is hardware for railways applications which runs the Nomad Tech on-board software (Linux based).

The MB1000 series Monitoring Box hardware platform has multiple interfaces to connect and gather data/information from different train on-board equipments. The collected data can be locally pre-processed and sent to a shore side application server either by existing communication equipment via LAN, or via plugged-in cellular modem.

The MB1000 series Nomad Tech Monitoring Box hardware platform is rugged and completely maintenance free.

Interfaces & Port Connectors

LAN Port	1 x isolated GbE 10/100/1000 LAN interface IEEE802.3ab Industrial M12 bulkhead 8-pin A-coded connector
SIM Module Interface	2 x Mini SIM sockets with module detection
Serial Interfaces	4 x configurable RS232/RS485 serial ports - Software programmable <i>All serial interfaces are galvanic isolated by using optocouplers (1,5 kVrms)</i>
Digital Inputs and Outputs	Four digital inputs and four digital outputs Relay output with changeover contact <i>All digital inputs/outputs are galvanic isolated by using optocouplers (1,5 kVrms)</i>
GPS receiver	1 x GNSS receiver, QMA Antenna connector <i>High Sensitivity multi GNSS GPS Receiver (HSGPS)</i> <i>GPS Receiver antenna circuit provides 5VDC@30mA to the antenna LNA</i> <i>GPS receiver includes an antenna supervision circuit, that is able to detect short circuits and antenna disconnection</i>
Mini PCIe Expansion Slot	1x PCIe MiniCard socket including a PCI lane and USB, to host a LTE cellular modem or a Wi-Fi modem, 3x antenna connectors, QMA 2x SD-Card socket
Program and Data storage	1x SD card, 8GB Combined program and data storage
Led status lights	4x LEDs (2x for LAN, 1x Power OK, 1x PCIe-Module)

Power Requirements

	Internal isolated DC/DC converter for vehicle batteries of 24, 48, 72, 96 and 110VDC requirements in EN50155 Sec 5.1.1 <i>Power input with reverse polarity and overvoltage protection</i> <i>Inrush current limiter</i> <i>Power input protected by a fuse internally</i>
Power Input	Power Option: the unit can be powered by PoE through the Ethernet port. Isolation of power inputs from ground $\geq 2000V$ Power Supply interface is floating

Environmental & Physical

Temperature range	Operating: -40°C to +70°C, and 85°C for 10 minutes
	Storage Temperature: -40°C to +80°C, humidity 5-95% non-condensing
Mean Time Between Failure	MTBF ≥250,000 hours
Humidity	Compliant with EN 50155:2007 – Section 4.1.4
Protection Class	class IP54 EN60529 - IP54 metal casing, supports conductive cooling (fanless operation)
Dimensions	15cm (W) x 18cm (L) x 6cm (H)
Colour	Light grey/anodized clear aluminium with blue front and rear plate
Installation	Wall brackets included

Standards compliance

Shock and vibration	EN 50155:2007 section 4.1.3
	EN 61373:2010
EMC	EN 50155:2007 (sections: 12.2.1, 12.2.2, 12.2.3, 12.2.4, 12.2.6, 12.2.7, 12.2.8, 12.2.9, 12.2.11)
	EN 50121-3-2:2007
Fire Safety	EN 45545:2013
Ingress Protection	BS EN 60529:1992+A2:2013

