



Danny Dias Ferreira

**Supervisão e controlo remoto da Iluminação e Ar
Comprimido, em ambiente industrial**



Danny Dias Ferreira

Supervisão e controlo remoto da Iluminação e Ar Comprimido, em ambiente industrial

Relatório de Projeto apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Abílio Manuel Ribeiro Borges, Assistente Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos

UID/EMS/00481/2019-FCT -
FCT - Fundação para a Ciência e
a Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-
022083 - Programa Operacional
Regional do Centro (Centro2020),
através do Portugal 2020 e do
Fundo Europeu de Desenvolvi-
mento Regional;

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Ana Maria Pinto de Moura

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Aos meus pais e família,

Ao meu orientador pela infinita disponibilidade sempre prestada para me guiar neste Projeto,

Ao meu co-orientador pelo espírito de iniciativa inculcado e pela assistência incondicional prestada ao longo do trabalho,

Ao Afonso, Diogo, Francisco e João pelo companheirismo nos últimos cinco anos,

A todos vós que participaram nesta caminhada que me trouxe até este momento, o meu muito e sincero obrigado.

Palavras-chave

Controlo e Monitorização Remotos; *Internet of Things*; Iluminação; Ar Comprimido; Eficiência Energética; Node-Red

Resumo

Ao longo dos anos tem-se assistido à crescente consolidação do paradigma da *Internet of Things* em ambiente industrial, tendo sido exatamente neste âmbito que se desenvolveu o Projeto descrito no presente documento.

Com vista à promoção da eficiência do consumo dos recursos energéticos utilizados na Atena - Automação Industrial Lda, procedeu-se a um levantamento dos principais desperdícios de energia associados às redes de iluminação e de ar comprimido nesta empresa. A partir deste levantamento identificaram-se as necessidades mais prementes de intervenção que guiaram o desenvolvimento dos trabalhos efetuados.

Neste sentido, e face à realidade encontrada, reconheceu-se como essencial criar um sistema de controlo e monitorização remotos da iluminação e do ar comprimido nas suas instalações. Assim, concebeu-se um sistema modular com diferentes módulos a desempenhar funções específicas, comunicando entre si através do protocolo MQTT.

Relativamente à iluminação, implementou-se uma arquitetura de controlo por zonas com base em níveis (*thresholds*) de fluxo luminoso configuráveis. Os horários de funcionamento do sistema de iluminação são também programáveis por zona.

Quanto à rede de ar comprimido, apenas se procedeu à monitorização dos consumos de ar, com possibilidade de incorporação de uma electroválvula com controlo remoto para cessar o fornecimento de ar em caso de necessidade.

A modularidade dos componentes sensoriais e de controlo com comunicação sem fios permitiu contornar a necessidade de cablagens ao longo da instalação fabril, permitindo de igual modo a escalabilidade rápida do sistema. Por último, procedeu-se ainda ao estudo da aplicabilidade de algoritmos de *machine learning* à deteção humana nas zonas de escritórios dentro da empresa, tendo em vista a otimização da iluminação nestas áreas. Aplicaram-se os algoritmos *Support Vector Machine* (SVM) e *Decision Trees* (DT).

A implementação de todo o projeto assenta sobre a plataforma Node-Red que desempenha o papel de servidor central onde a informação é processada, sendo ainda responsável pela criação da interface acessível remotamente (juntamente com os controlos manuais).

Concluindo, a solução implementada apresentou um bom desempenho, cumprindo as funções para as quais foi desenvolvida. A interface remota intuitiva permite consultar o estado do sistema e configurar os parâmetros que o utilizador considere necessários. O baixo custo aliado à fácil instalação fazem desta uma solução atrativa que poderá ser implementada noutras instalações, no meio industrial e residencial.

Keywords

Remote Management; Internet of Things; Lighting; Industrial Compressed Air; Energy Efficiency; Node-Red

Abstract

Throughout the years, the paradigm of the Internet of Things has been gaining strength in the industrial environment. It was precisely in this context that the project described in this thesis was developed.

In order to promote an efficient consumption of energy resources in Atena - Automação Industrial Lda, a survey was carried out to determine the main energy wastes associated with the company's lighting and the compressed air system network. From the data collected, it was possible to identify the most urgent needs of intervention on which the development of the work performed was based upon.

As a result, and considering the reality encountered, it was ascertained as essential to create a remote control and monitoring system for lighting and compressed air in its facilities. Thus, a modular system with different modules performing specific functions and communicating with each other via the MQTT protocol was designed. Regarding lighting, an architecture that allows us to control various zones was implemented based on configurable luminous thresholds. The operating hours of the lighting system can also be programmed by zone.

Concerning the compressed air network, only the air consumptions were monitored, with the possibility of incorporating a solenoid valve controlled remotely to cease the air supply, if needed.

The modularity of the sensing and control components with wireless communication made it possible to bypass the need for wiring throughout the plant, while allowing for rapid system scalability.

Finally, we also studied the applicability of machine learning algorithms to human detection in office areas within the company in order to optimize lighting in these areas. Support Vector Machine (SVM) and Decision Trees (DT) algorithms were applied.

The entire project was implemented based on the Node-Red platform, which serves as the central server where the information is processed. It is also responsible for creating the remotely accessible interface (along with manual controls).

In conclusion, the implemented solution worked out, fulfilling the functions for which it was developed. The intuitive remote interface allows us to check the system status and to configure any parameters we deem necessary. The low cost combined with the easy installation make this an attractive solution to implement in other buildings, both industrial and residential.

Índice

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Enquadramento do projeto	3
1.2	Guia de Leitura	4
2	A empresa	5
2.1	Caracterização da Iluminação	6
2.2	Caracterização da Rede de Ar Comprimido	7
3	Estado da Arte	9
3.1	Enquadramento do Projeto na Legislação Energética	9
3.2	A Iluminação	9
3.2.1	Componentes de iluminação	13
3.2.2	Arquiteturas de controlo e monitorização	14
3.2.3	Estratégias de controlo	15
3.2.4	Técnicas de Regulação do Fluxo Luminoso	17
3.2.5	Protocolos de comunicação	20
3.3	Monitorização de Ocupação	29
3.3.1	Métodos Diretos e Indiretos	30
3.3.2	Algoritmos de Classificação	30
3.4	O Ar Comprimido	34
3.4.1	Compressores	35
3.4.2	Redes de Ar Comprimido e respetiva Manutenção	38
3.4.3	Soluções de Controlo e Monitorização de Ar Comprimido Industrial	38
II	Solução Proposta	41
4	Descrição geral da solução proposta	43
4.1	Caracterização da solução	43
4.2	Arquitetura da solução	44
4.3	Base de Dados	46
4.4	Regulação do Fluxo Luminoso	46
4.5	Monitorização de Presença	47

5	Implementação da solução	49
5.1	Hardware	49
5.1.1	Monitorização da Luminosidade	49
5.1.2	Controlo de Luminárias	50
5.1.3	Servidor (CDR)	50
5.1.4	Regulação do Fluxo Luminoso	51
5.1.5	Monitorização Consumos Elétricos	53
5.1.6	Monitorização do Consumo de Ar Comprimido	54
5.1.7	Esquemas Elétricos	56
5.2	Centro de Decisão e Registo - CDR	56
5.2.1	Node-Red	56
5.2.2	Algoritmo de Controlo da Iluminação	56
5.2.3	Modo de Hibernação	57
5.2.4	Interface Gráfica	58
5.2.5	Gestão de Alertas	62
5.2.6	Monitorização do Ar Comprimido	63
5.2.7	Base de Dados	64
5.3	Monitorização de Presença Humana	66
5.3.1	Monitorização de Presença por Contagem de Pessoas	67
5.3.2	Detecção de Presença com Algoritmos de <i>Machine Learning</i>	68
III	Discussão da Solução Implementada	73
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	75
IV	Apêndices	85
A	Algoritmo de Controlo Da Iluminação	87
B	Algoritmo do Modo de Hibernação	89
C	Diagrama Elétrico PCB - Consumo de Energia Elétrica	91
D	Diagrama Elétrico PCB - Regulação do Fluxo Luminoso	93
E	Diagrama Elétrico PCB - Medição do Caudal de Ar Comprimido	95
F	Esquema Elétrico da Instalação do Sonoff	97
G	Interface Remota Desenvolvida	99
H	Características do módulo de controlo das luminárias LED Hydra 150W da Philips	105

Lista de Tabelas

5.1	Exemplo da tabela associada a uma determinada zona	65
5.2	Tabela com o registo dos diferentes <i>thresholds</i>	65
5.3	Exemplo da tabela com o horário associado a uma determinada zona . . .	66
5.4	Exemplo da tabela com o horário de eventos extraordinários	66

Lista de Figuras

2.1	Layout das áreas da empresa	5
2.2	Tecnologia de iluminação LED atualmente existente no chão de fábrica da empresa	6
2.3	Tecnologia de iluminação antiga que existia no chão de fábrica da empresa	6
2.4	Instalação da unidade compressora existente na empresa	7
3.1	Principais tipos e agrupamentos de tecnologias de iluminação existentes	10
3.2	Lâmpada de halogéneo	10
3.3	Lâmpada fluorescente em espiral	11
3.4	Lâmpada de sódio de alta pressão	12
3.5	Lâmpada de sódio de iodetos metálicos	12
3.6	Exemplo de um dos inúmeros modelos de lâmpadas com tecnologia LED	13
3.7	Resumo das eficiências (lúmens/watt) atingidas com as diferentes tecnologias de iluminação (Adaptado de [6])	13
3.8	Sinais de PWM com diferentes valores de duty cycle (Adaptado de [13])	17
3.9	Onda sinusoidal representativa do controlo de fase (Adaptado de [15])	18
3.10	Variações de tensão, corrente e fluxo luminoso em diferentes tecnologias de iluminação (Adaptado de [16])	19
3.11	Esquema simplificado do regulador de tensão Wattguard (Adaptado de [16])	19
3.12	Esquema simplificado de um sistema de injeção de tensão em oposição de fase (Adaptado de [18])	20
3.13	Sistema DALI completo com as ligações elétricas (Adaptado de [20])	22
3.14	Estrutura da mensagem do protocolo DALI	22
3.15	Resposta da regulação de fluxo luminoso do sistema DALI segundo uma curva logarítmica (Adaptado de [20])	23
3.16	Comparação de redes sem fios [22]	23
3.17	Rede em malha do sistema Zigbee [22]	24
3.18	Processo de roteamento na rede do sistema Zigbee [22]	24
3.19	Estrutura do pacote Modbus RTU	25
3.20	Modelo pub/sub (Adaptado de [25])	27
3.21	Exemplo de um tópico referente, ao controlo de uma televisão que se encontra na sala de estar de uma habitação	27
3.22	Representação de diferentes hiperplanos (Adaptado de [33])	31
3.23	Hiperplano e margens de um exemplo com classes completamente separáveis (Adaptado de [33])	32
3.24	Casos de separação linear (esquerda) e não linear (direita) de classes (Adaptado de [33])	32

3.25	Consequências dos diferentes valores de suavização da margem - parâmetro "C"(Adaptado de [33])	33
3.26	Diferentes tipos de fronteiras de decisão correspondentes aos métodos de <i>kernel</i> linear, polinomial e rbf, respetivamente (Adaptado de [33])	33
3.27	Matriz de Confusão	34
3.28	Tipos de compressores [36]	36
4.1	Arquitetura da solução proposta	45
4.2	Proposta do módulo de regulação do fluxo luminoso	46
4.3	Arquitetura da proposta do módulo de deteção de presença	48
5.1	Componentes do sistema de leitura da luminância de uma determinada zona - Módulos M1 e M2 da Figura 4.1	49
5.2	Sonoff 4 Ch Pro - Módulo M4 da Figura 4.1	50
5.3	Raspberry Pi Modelo 3B + - Módulo "Centro de Decisão e Registo" da Figura 4.1	51
5.4	Módulo de regulação do fluxo luminoso	51
5.5	Tipos de Resposta	52
5.6	Diagrama do circuito elétrico do filtro Passa- Baixo	53
5.7	Exemplo das ligações à placa Nodemcu para detetar o evento de pressionar um botão	54
5.8	Componentes do sistema de leitura dos consumos energéticos de um grupo de luminárias - instalado junto ao Módulo M4 da Figura 4.1	54
5.9	Topologia de ligação sequencial dos vários equipamentos medidores de energia	55
5.10	Circuito interno do caudalímetro do tipo PNP	55
5.11	Componentes do sistema de monitorização e controlado ar comprimido - Módulo M3 da Figura 4.1	55
5.12	Interface de Login para aceder ao ambiente de programação do Node-Red	57
5.13	Controlo da iluminação da zona de maquinaria	58
5.14	Definição do horário geral de semana e fim de semana	59
5.15	Definição do horário para eventos extraordinários	60
5.16	Tabela com registo de eventos extraordinários	60
5.17	Configuração dos <i>Thresholds</i>	61
5.18	Controlo manual da iluminação no quadro elétrico: Ligar/Desligar as luminárias através dos botões do sonoff com sistema redundante (ligado em paralelo) constituído por interruptores de corte para precaver alguma falha do sonoff	62
5.19	Ativação e desativação dos Controlos Manuais	62
5.20	Exemplos de alertas via email de dois módulos diferentes	63
5.21	Exemplos do perfil de consumo de ar comprimido (total) realizado na fase de teste	63
5.22	Modelo PFM725S-01-L-B da SMC	64
5.23	Cálculo e registo dos consumos semanais de ar comprimido	64
5.24	Aplicação para contagem de pessoas com dois sensores de infravermelhos E18-D80NK e uma placa Nodemcu com o módulo WiFi ESP8666	67

5.25	Sequência dos sinais lógicos enviados pelos sensores infravermelhos para a placa Nodemcu à medida que o utilizador sai da sala	68
5.26	Aplicação para o registo da potência e corrente elétrica de uma tomada com um contador SDM120 e uma placa Nodemcu com o módulo WiFi ESP8666	69
5.27	Pedido HTTP do tipo GET para o Servidor Python implementado no Node-Red	71
5.28	Tempos de processamento dos diferentes algoritmos de machine learning a correr no servidor Python	71
6.1	Comportamento de um grupo de luminárias em função da luminosidade registada	77
6.2	<i>Confusion matrix</i> associada a cada algoritmo utilizado	78
A.1	Fluxograma do Controlo da Iluminação	88
B.1	Fluxograma do Modo de Hibernação	89
C.1	Diagrama Elétrico	91
D.1	Diagrama Elétrico	94
E.1	Diagrama Elétrico	95
F.1	Esquema Elétrico da Instalação de Um Sonoff 4 Ch Pro	97
F.2	Esquema Elétrico da Instalação de Um Sonoff 4 Ch Pro (continuação)	98
G.1	Menu Principal da interface remota	100
G.2	Menu de Configuração da interface remota	101
G.3	Menu com os registo dos eventos extraordinários criados	102
G.4	Menu de monitorização dos consumos de ar comprimido	103
H.1	Informação relativa à regulação do fluxo luminoso do controlador das luminárias Hydra 150W da Philips.	105

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

A iluminação representa uma grande fatia do consumo de energia elétrica quer em ambiente doméstico, quer nos meios industrial e de serviços. Neste último caso, porém, a existência de equipamentos consumidores intensivos de energia elétrica e o elevado número de horas que estes trabalham por dia, acentuam ainda mais a necessidade da redução de consumos energéticos.

A produção de ar comprimido, o aquecimento de água ou os sistemas de climatização, constituem outras formas de energia amplamente utilizadas na indústria. Por serem fontes de energia dispendiosas, também aqui se deve otimizar a sua produção e monitorizar com detalhe as respetivas utilizações.

Tais reduções energéticas assumem grande relevo por influírem diretamente o aumento da competitividade das empresas, no meio industrial.

Aliando os pressupostos anteriores a preocupações de foro ambiental, torna-se então necessário o estudo e implementação de soluções que promovam a eficiência na utilização e transformação dos recursos energéticos em instalações industriais.

1.1 Enquadramento do projeto

Neste trabalho, a atenção é focada nos consumos de energia elétrica inerentes à iluminação, bem como na produção de ar comprimido.

Como objetivo último, procura-se reduzir os custos energéticos que a iluminação e o ar comprimido exercem sobre o total de custos de atividade numa unidade industrial, nomeadamente, numa empresa de projeto e produção de equipamentos na área da automação industrial, serviços, área alimentar e biomédica, a Atena - Automação Industrial.

Com vista à concretização dos objetivos definidos, na área da iluminação, pretende-se desenvolver um sistema inteligente de controlo e monitorização remotos que atue autonomamente garantindo a iluminação adequada a cada posto de trabalho, minimizando em simultâneo as necessidades energéticas para o efeito.

Quanto à produção de ar comprimido, os objetivos passam pelo estudo da adequação da rede de ar comprimido existente face às necessidades da empresa, acrescentando ainda, o desenvolvimento de um sistema de monitorização dos consumos de ar comprimido.

O sistema de gestão energética em causa incorpora tanto a vertente da iluminação como da produção de ar comprimido e tem por base uma rede de sensores sem fios responsáveis pela recolha de informação e envio desses dados para um centro de decisão.

Nesta unidade central, a informação é tratada e registada numa base de dados. Paralelamente, algoritmos desenvolvidos igualmente no âmbito deste trabalho são responsáveis pela tomada de decisões e consequentes ações sobre os elementos a controlar - iluminação e rede de ar comprimido.

1.2 Guia de Leitura

O presente documento encontra-se dividido em quatro partes.

Na primeira parte, Enquadramento, é apresentada, no Capítulo 1, uma introdução breve com a descrição geral do projeto a desenvolver, assim como os objetivos propostos. No Capítulo 2, a seguir, procede-se à apresentação da empresa na qual o projeto foi implementado e ainda de uma caracterização sumária das necessidades de intervenção às quais este projeto tenta dar resposta. A terminar a primeira parte, surge o Capítulo 3, onde é abordado o Estado da Arte com o estudo e a análise das soluções existentes nas diferentes áreas de atuação.

A segunda parte, Solução Proposta, é constituída por dois capítulos, nos quais são dados a conhecer a descrição geral da solução proposta - Capítulo 4 - com a identificação dos requisitos que a solução tem de apresentar, assim como a sua arquitetura, e ainda, os aspetos particulares da implementação do projeto - Capítulo 5.

Na terceira parte, Discussão da Solução Implementada, são apresentadas no Capítulo 6 as conclusões retiradas a partir do trabalho efetuado com a análise do desempenho do projeto e das diferentes partes que o constituem. Adicionalmente, são apresentadas propostas de desenvolvimento e melhorias futuras da solução já implementada.

A quarta e última parte é constituída por apêndices com informação complementar relativa à implementação do projeto descrita na segunda parte do documento.

as Zonas B e C onde se localizam a rede de ar comprimido, bem como o maior consumo associado à iluminação, com mais de 20 luminárias distribuídas pelo chão de fábrica. A Zona Exterior, nomeadamente a pala existente na traseira do pavilhão, também se inclui nas áreas de interesse mais relevantes.

2.1 Caracterização da Iluminação

A iluminação existente nas Zonas B e C é constituída por soluções eficientes com tecnologia LED (Díodo Emissor de Luz), designadamente, o modelo Hydra 150W da Philips (Figura 2.2). Estas luminárias substituíram os modelos mais antigos de iluminação fluorescente, presentes na Figura 2.3.



Figura 2.2: Tecnologia de iluminação LED atualmente existente no chão de fábrica da empresa

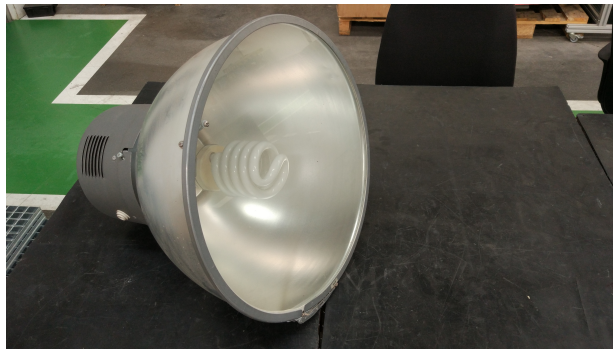


Figura 2.3: Tecnologia de iluminação antiga que existia no chão de fábrica da empresa

Quanto à zona A, apesar de ainda existirem luminárias fluorescentes tubulares, estas têm vindo a ser substituídas pela respetiva alternativa LED, à medida que chegam ao fim de vida útil. Mais ainda, grande parte das salas e escritórios nesta zona possuem grandes envidraçados para o exterior, o que leva a menores necessidades de luz artificial e faz desta uma zona de intervenção secundária, em relação ao chão de fábrica.

Assim, quanto ao tipo de tecnologia de iluminação utilizada na empresa, verifica-se que esta é adequada aos propósitos da gestão eficiente de energia pretendidos.

No entanto, é na sua utilização que são identificadas algumas falhas graves a corrigir. Mais concretamente, são repetidas as situações de desperdício energético sob a forma de iluminação, com luminárias ligadas em zonas desocupadas durante o horário laboral, e

ainda para além deste período, quando o chão de fábrica ou os escritórios se encontram, naturalmente, livres de ocupação.

2.2 Caracterização da Rede de Ar Comprimido

A rede de ar comprimido instalada na empresa tem sofrido evoluções positivas no sentido do aumento da eficiência energética, na medida em que, a rede está equipada com a tecnologia necessária para o correto tratamento do ar produzido, nomeadamente filtros, secador de ar e depuradores de condensados. A par destes cuidados, a unidade compressora foi inclusive substituída recentemente, passando de um compressor volumétrico alternativo de pistão para um compressor rotativo de parafuso - modelo SK25 - pertencente à gama de compressores mais recente e eficiente do fornecedor KAESER.

Novamente, quanto ao tipo de tecnologia implementada, não se regista necessidade de intervenção na rede de ar comprimido. Pretende-se, no entanto, ter conhecimento dos perfis de utilização do ar comprimido, por este ser totalmente desconhecido na atualidade e por se tratar de uma matéria prima dispendiosa.

Desta forma, no que à rede de ar comprimido respeita, a intervenção é focada apenas na monitorização remota e no registo histórico dos consumos.

A instalação da unidade de compressão existente na empresa encontra-se na Figura 2.4.



Figura 2.4: Instalação da unidade compressora existente na empresa

Capítulo 3

Estado da Arte

3.1 Enquadramento do Projeto na Legislação Energética

Segundo a ADENE [1], o consumo energético do setor industrial representa cerca de 30% do consumo final de energia do País.

Perante tal quantioso valor percentual, é imperativo que se promova, por parte da indústria, uma adequação dos seus equipamentos e processos, tirando o máximo partido de novas tecnologias e estratégias atualmente disponíveis.

O SGCIE - Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia prevê que instalações consumidoras intensivas de energia (CIE), com consumo anual de energia superior a 500 toneladas equivalente de petróleo (tep), realizem periodicamente auditorias energéticas que incidam sobre as condições de utilização de energia e promovam o aumento da eficiência energética.

Para tal, e com base nas auditorias realizadas, procede-se à elaboração de Planos de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn). Estes planos contemplam o conjunto de medidas que visam a gestão mais eficiente de energia por parte das empresas, bem como os objetivos mínimos de eficiência a atingir. De entre as medidas a executar, encontra-se, por exemplo, a utilização de fontes de energia renováveis.

O PREn é elaborado para um período de 8 anos. Os objetivos mínimos finais variam de acordo com os consumos energéticos da empresa que o implementa.

No que respeita à empresa onde este Projeto é desenvolvido, Atena - Automação Industrial, apesar de esta não ser considerada uma CIE, tem, ao longo dos anos, promovido ativamente iniciativas no sentido de reduzir os consumos energéticos, como visto anteriormente.

3.2 A Iluminação

A fim de se alcançar uma rede de iluminação eficiente, garantindo, simultaneamente, os níveis de iluminação adequados a cada tipo de ambiente laboral, a escolha do tipo de tecnologia de iluminação assume especial interesse num projeto de iluminação.

Remetendo os princípios específicos de funcionamento para um plano secundário, pretende-se sobretudo abordar os aspetos mais objetivos de cada tecnologia, desde a área de utilização até à eficiência energética.

Os sistemas de iluminação agrupam-se de acordo com o esquema da Figura 3.1.

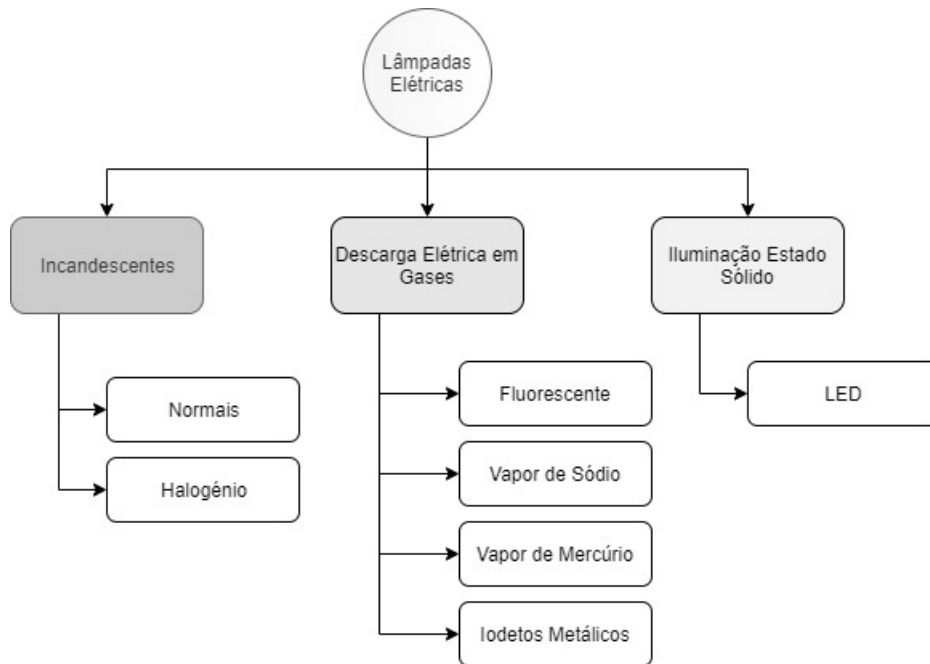


Figura 3.1: Principais tipos e agrupamentos de tecnologias de iluminação existentes

3.2.0.1 Lâmpadas incandescentes

Por terem sido descontinuadas no mercado e dada a baixa eficiência comparativamente às demais opções oferecidas pelos fabricantes na área da iluminação, a referência a lâmpadas incandescentes convencionais será omitida.

A alternativa mais próxima da solução anterior e mais eficiente cerca de 30% é a lâmpada incandescente de halogéneo [2]. É no uso doméstico que esta solução tem maior expressão, oferecendo luz clara e instantânea, de fácil substituição, totalmente regulável para todos os tipos de brilho e com uma boa restituição cromática. No entanto, também esta solução começa a ser abandonada tendo já sido proibida a comercialização de alguns modelos menos eficientes, na União Europeia.



Figura 3.2: Lâmpada de halogéneo

3.2.0.2 Lâmpadas de descarga elétrica em gases

Avançando um passo em frente no que ao aumento da eficiência diz respeito, tem-se as lâmpadas de descarga elétrica em gases.

- **Fluorescente**

A iluminação de tarefas em áreas de estudo, escritórios domésticos e outros espaços mais amplos como garagens ou corredores são os locais de eleição para o emprego de lâmpadas fluorescentes [3]. O seu formato vai deste o mais compacto ao modelo tubular, existindo também em diferentes temperaturas de cor. O tempo de vida útil deste tipo de lâmpadas situa-se entre 6000 a 15 000 horas de utilização.



Figura 3.3: Lâmpada fluorescente em espiral

- **Vapor de sódio**

As lâmpadas de sódio de alta pressão oferecem a eficiência luminosa mais elevada de todas as lâmpadas de descarga de alta pressão e ainda luz constante ao longo da sua longa vida útil.

Este tipo de lâmpada utiliza-se, principalmente, na iluminação rodoviária e residencial, em áreas industriais e em instalações desportivas e recreativas.

Por outro lado, as lâmpadas de sódio de baixa pressão emitem luz laranja e são empregues em situações nas quais a restituição de cor não é um fator importante, dada a má reprodução de cor deste tipo de iluminação.

Do conjunto de lâmpadas de descarga elétrica de gases, este último tipo apresenta a maior eficiência luminosa, sendo utilizada sobretudo na iluminação rodoviária e em espaços públicos.

- **Vapor de Mercúrio**

Quando comparada às lâmpadas fluorescentes, a pressão de funcionamento mais alta das lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão assegura a emissão de luz mais visível e menos radiação UV.

Recorre-se a lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão em todas as aplicações que exijam luz branca, uma vida útil longa e custos de investimento baixos.



Figura 3.4: Lâmpada de sódio de alta pressão

- **Iodetos metálicos**

As lâmpadas de descarga de alta pressão de vapor de iodetos metálicos [4] apresentam um elevado fluxo luminoso branco e brilhante e ainda uma excelente restituição cromática, com temperaturas de cor semelhantes à luz do sol.

Usualmente, são utilizadas na iluminação profissional de estádios, em praças, indústrias e pavilhões.



Figura 3.5: Lâmpada de sódio de iodetos metálicos

3.2.0.3 Iluminação Estado Sólido

- **LED**

Com uma duração de vida útil mais longa e um consumo até 80% menor de energia, a iluminação LED [5] assume-se como uma alternativa de peso em relação às fontes de luz tradicionais.

Ademais do arranque imediato, sem período de aquecimento, este tipo de iluminação oferece ainda uma variedade de tonalidades de branco, estando disponível desde o quente branco amarelado até ao frio azul.

A restituição cromática elevada, a possibilidade de regulação de intensidade e a vida útil que pode atingir as 20000 horas são fatores acrescidos que explicam a ampla utilização deste tipo de iluminação num conjunto transversal de áreas de aplicação, desde iluminação pública, residencial, comércio até à indústria.

Um resumo representativo das diferentes eficiências associadas a cada tecnologia de iluminação pode ser consultado na Figura 3.7.



Figura 3.6: Exemplo de um dos inúmeros modelos de lâmpadas com tecnologia LED

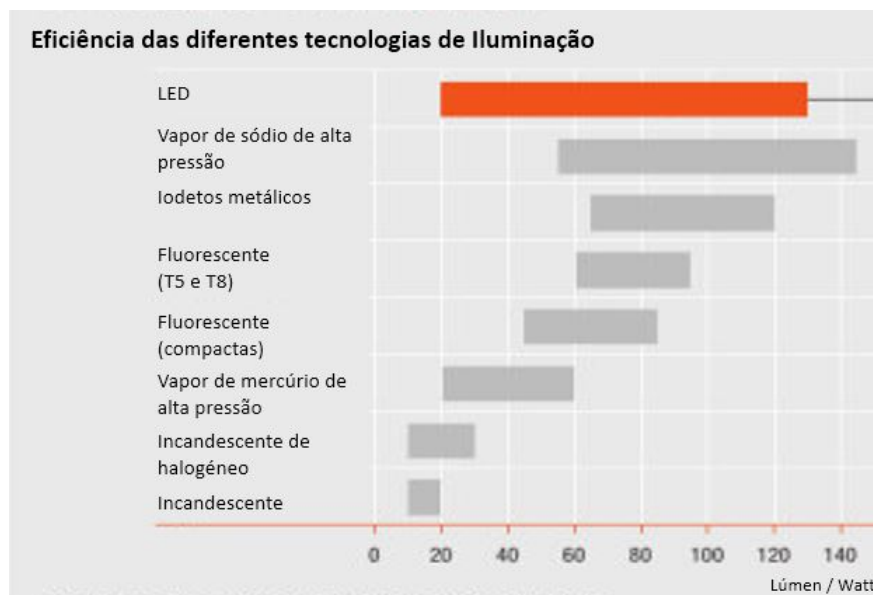


Figura 3.7: Resumo das eficiências (lúmens/watt) atingidas com as diferentes tecnologias de iluminação (Adaptado de [6])

3.2.1 Componentes de iluminação

Os parâmetros de entrada de um sistema de controlo de iluminação consistem em informação proveniente de diferentes tipos de sensores como são exemplo os detetores de presença, intensidade de iluminação ou movimento, entre outras possibilidades. Com base no tratamento desta informação, são tomadas ações que se concretizam no controlo das luminárias.

- Um dos principais elementos do sistema de controlo é o sensor fotoelétrico. A sua utilização permite aferir a quantidade de luz que chega aos locais desejados, fazendo chegar essa informação a um controlador responsável pela regulação da iluminação, de acordo com as necessidades.

A localização destes sensores é fundamental para um controlo eficaz da iluminação. O teto ou as paredes são as zonas mais comuns para a instalação destes componentes, sendo aí posteriormente calibrados, caso necessário. Zonas com sombras ou que se encontrem muito afastadas do local onde o sensor realiza as medições

poderão ser iluminadas insuficientemente. Nestes casos o algoritmo de controlo deverá estar preparado para corrigir tais particularidades.

- Sensores de ocupação podem também assumir grande importância sobretudo em espaços como escritórios ou pequenas áreas, onde o número de pessoas é mais reduzido ou quando existe necessidade constante de estas se deslocarem dentro do edifício, abandonando o posto de trabalho, o que torna desnecessário uma luminária ligada, durante esse período.
- A unidade de controlo é o elemento central do sistema. Aqui corre o algoritmo que afere o tipo de ação a tomar, baseado na informação proveniente dos sensores existentes e responsáveis pela recolha de informação.

Estas ações passam por ligar ou desligar as luminárias ou ainda regular a potência fornecida. Outros tipos de ações poderão passar também pelo envio de alertas e atualizações de informação (estado das lâmpadas ou consumos energéticos) para uma base de dados.

- *Dimmers* e interruptores completam os elementos fulcrais de um sistema de controlo.

Os interruptores, quer convencionais quer via circuito electrónico de comutação, podem encontrar-se ao lado ou no próprio quadro eléctrico ou ainda no fim da rede de iluminação antes das luminárias. Dependendo da solução exigida pode ser necessário, ou pelo menos conveniente, ter acesso manual sobre o controlo da iluminação (em paralelo ou sobreposto ao controlo autónomo).

Uma abordagem de controlo da iluminação menos intrusiva é conseguida com o recurso à regulação da intensidade luminosa. Este tipo de atuação baseia-se na coexistência de luz natural e luz artificial, fazendo oscilar a potência fornecida às lâmpadas de tal modo que, em conjugação com a luz proveniente do exterior, se garanta o equilíbrio da intensidade luminosa em torno de um valor pré-definido. Em comparação com o recurso a interruptores, esta solução de regulação permite geralmente maiores poupanças energéticas [7]. No entanto, para locais fechados, nos quais o aproveitamento de luz natural seja diminuto, assume-se como mais recomendável o emprego de interruptores.

3.2.2 Arquiteturas de controlo e monitorização

A monitorização e atuação, quer remota quer local, sobre uma rede de iluminação assenta num correto planeamento e desenvolvimento de um sistema de controlo.

Com efeito, torna-se pertinente uma discussão prévia acerca das várias arquiteturas aplicáveis ao controlo de iluminação.

3.2.2.1 Arquiteturas

No que concerne ao modo de controlo, várias são os aspetos a considerar. Em primeiro lugar, é possível distinguir um controlo em circuito fechado, no qual o sistema é capaz de detetar a influência tanto da luz proveniente do exterior como da luz artificial eléctrica no espaço a controlar, ajustando-se para garantir sempre a iluminação pretendida, quer de

forma contínua ou por degraus. Por conseguir acomodar várias mudanças no ambiente a controlar, o controlo em circuito fechado pode ainda conseguir adaptar-se, por exemplo, à adição de telhas translúcidas, remoção ou abertura de janelas e persianas, comandos manuais de utilizadores, entre outros fatores.

Já um controlo em circuito aberto, apenas é sensível, por norma, à quantidade de luz natural (ou a um horário), ignorando qualquer outra fonte de influência que interfira com a iluminação final pretendida.

As designações anteriores podem ainda ser consideradas sistemas ativos ou passivos [8], respetivamente.

Quanto à implementação propriamente dita, em [9] são descritas as principais arquiteturas aplicáveis.

A **arquitetura de gestão autónoma** permite que cada luminária se "gira" a si própria. Esta pode incluir sensorização capaz de detetar as necessidades de iluminação pretendida e atuar independentemente do resto do sistema de controlo. Os sensores incorporados podem ser de presença ou luminosidade, por exemplo, o que permite que diferentes luminárias sigam distintas estratégias de controlo.

A **arquitetura de gestão por zona** pode ser utilizada para comandar várias luminárias que interagem entre si numa determinada zona. Este tipo de arquitetura proporciona uma iluminação ambiente mais uniforme e é, em geral, uma solução menos dispendiosa que a anterior.

Uma **arquitetura de controlo centralizada** é uma alternativa mais complexa que as anteriores e com uma implementação mais dispendiosa. No entanto, trata a iluminação do edifício como um todo, em vez de zonas isoladas. Esta gestão pode traduzir-se em poupanças energéticas superiores, além de permitir uma possibilidade de controlo manual facilitado e imediato sobre qualquer zona do edifício.

3.2.2.2 Monitorização

A supervisão é imprescindível para que seja retirado o máximo rendimento do sistema de controlo instalado, na medida em que, permite conhecer o estado de cada componente, identificar falhas, fazer diagnósticos da rede e agilizar a correção de potenciais problemas [10].

Quanto ao modo, a monitorização pode ser apresentada das seguintes formas: num consola ou computador num local fixo junto à rede de iluminação; remotamente em vários dispositivos em simultâneo, dentro do edifício, que estejam ligados numa rede LAN; em soluções completamente remotas, acedida através da Internet a partir de qualquer ponto.

3.2.3 Estratégias de controlo

Em [9], são abordadas as principais estratégias aplicáveis ao controlo de iluminação. Numa aplicação real, as estratégias discutidas, de seguida, podem ser implementadas isoladamente ou em conjunto, o que influencia a complexidade e o custo final da solução.

3.2.3.1 Estratégia baseada nos níveis de luminosidade

Uma das estratégias de controlo passa pela utilização da informação proveniente de sensores fotoelétricos que traduz os níveis de luminosidade instantânea.

Este tipo de controlo assenta na possibilidade de aproveitamento de luz natural e está associado ao uso de algoritmos simples baseados em *thresholds* (limites) que servem de referência para o sistema ligar ou desligar a iluminação.

Um inconveniente desta estratégia pode ocorrer quando se regista uma flutuação dos níveis de intensidade da luz exterior, na medida em que, a iluminação pode ligar e desligar repetidamente em resposta às flutuações supracitadas. Outro resultado igualmente indesejável pode ainda ser obtido quando a iluminação satisfaz a condição imposta pelo *threshold* quando está ligada, mas é insuficiente quando se encontra desligada.

Uma forma de mitigar este problema reside na utilização de vários *thresholds* na definição de condições para ligar ou desligar o sistema e algoritmos que tenham em conta o estado de cada luminária. Outra hipótese complementar será, uma vez que este se encontre ligado, a definição de atrasos na resposta do sistema para desligar.

3.2.3.2 Estratégia baseada na ocupação prevista

Em muitos casos, sobretudo nos postos de trabalho fixos, ou seja, onde se espera a presença a tempo inteiro de um utilizador, pode optar-se por uma estratégia baseada num horário pré-definido, sendo normalmente considerado o laboral.

Esta alternativa é conveniente nos casos em que a luz natural se revela insuficiente para satisfazer as condições de iluminação adequadas ao longo de todo o dia.

Trata-se de uma forma bastante simples e pouco dispendiosa que pretende evitar o consumo energético com iluminação quando esta não é necessária. No entanto, dependendo do sistema, este poderá não prever interrupções a meio do horário, como horas de refeição ou troca de turnos. De forma análoga, a ausência temporária de trabalhadores é também indetetável pelo sistema, embora haja aplicações mais avançadas que permitem a definição de diferentes horários para diferentes zonas, ou ainda o uso de algoritmos mais complexos utilizados na previsão de presenças de utilizadores [11].

3.2.3.3 Estratégia baseada na ocupação real

A estratégia baseada na ocupação real é a que garante um controlo da iluminação mais preciso. O seu funcionamento é baseado na deteção de presença e o objetivo é reduzir a utilização de iluminação ao mínimo indispensável. Quando um trabalhador se encontra sob o espaço de deteção dos sensores, a iluminação permanece ligada, caso contrário desliga-se.

Porém, e à semelhança dos demais tipos de controlo, este tem associados possíveis desvantagens que se podem manifestar no tempo (relativamente prolongado) de resposta do sistema para voltar a ligar as luminárias assim que seja detetada a presença de um trabalhador. Outro problema está ligado à sensibilidade do sensor de presença que poderá não detetar de imediato os utilizadores.

Dependendo da qualidade da solução a implementar e do número de espaços a controlar, esta estratégia poderá ser uma das mais dispendiosas.

A problemática da deteção de presença humana será abordada mais à frente no documento.

3.2.3.4 Estratégia baseada na luminosidade constante

A estratégia baseada na manutenção de iluminação constante baseia-se na obtenção de informação acerca dos níveis de luminosidade a partir de sensores fotoelétricos, à semelhança da primeira estratégia abordada em cima. No entanto, esta última tem a particularidade de regular o fluxo luminoso das lâmpadas em função das necessidades. Concretizando, caso os níveis de luminosidade sejam inferiores aos requeridos, o sistema aumenta o fluxo luminoso proveniente das luminárias. Por outro lado, caso outras fontes de luz sejam suficientes para iluminar as áreas pretendidas, o fluxo luminoso é reduzido, podendo mesmo ser desligado, se tal se justificar.

Com esta estratégia, não só o conforto ótico dos utilizadores é maximizado, como também é possível retirar um elevado proveito da utilização de luz natural, minimizando tanto as oscilações indesejáveis de fluxo luminoso sobre as áreas de trabalho, como os consumos energéticos.

3.2.4 Técnicas de Regulação do Fluxo Luminoso

3.2.4.1 PWM - Pulse Width Modulation

Segundo [12], e para os efeitos pretendidos neste trabalho, a modulação por largura de pulso (referida neste Projeto como PWM) é uma técnica para atingir resultados analógicos a partir de outputs digitais de um processador.

Controlos digitais são utilizados para criar um sinal de onda quadrada que alterna entre os estados *on* (V_{max}) e *off* ($V_{min} = 0$ Volts). O alternar entre *on* e *off* simula tensões entre V_{max} e V_{min} , consoante o tempo que o sinal se encontra em *on* versus a duração de tempo que o sinal esteja *off*. A duração de tempo de um pulso *on* é designada por *pulse width*. A percentagem de tempo, num período, que o sinal está *on* é o *duty cycle*. Assim, para se obter variação de tensões analógicas, basta modular o *pulse width*, obtendo diferentes *duty cycles*, conforme os exemplos expostos na Figura 3.8.

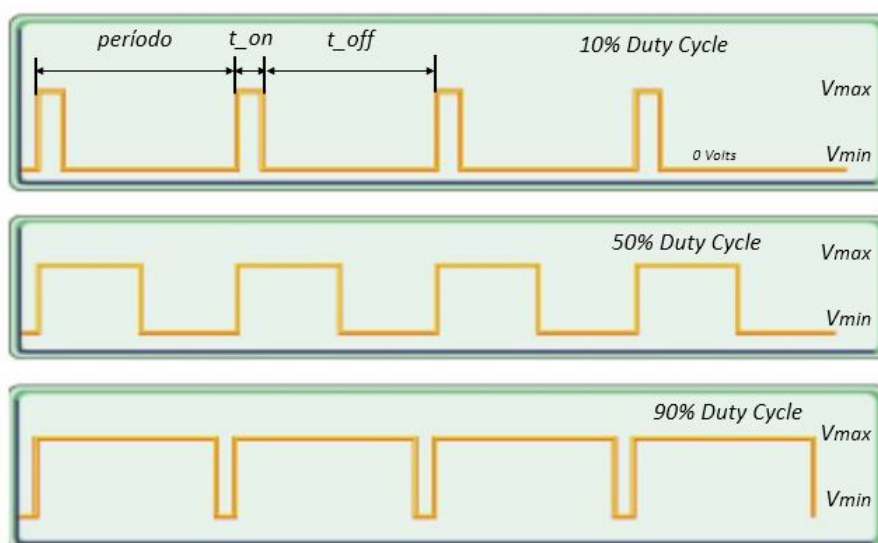


Figura 3.8: Sinais de PWM com diferentes valores de duty cycle (Adaptado de [13])

Por exemplo, para um *duty cycle* igual a 50%, se V_{max} for 10V, então o sinal analógico aplicado a uma carga seria metade, ou seja, 5V. Mais ainda, se esta carga fosse uma lâmpada, estaria ligada, emitindo apenas metade da sua intensidade de luz máxima.

Para se atingir o efeito de regulação contínua da intensidade da luz tem de se garantir uma frequência de modulação do sinal adequada. O mesmo significa que o período do ciclo tem de ser inferior ao tempo de resposta de alteração de estado de uma carga que se pretenda controlar. Comumente, utilizam-se frequências situadas entre 1kHz e 200 kHz, dependendo da aplicação em causa.

Apesar de ser uma técnica amplamente utilizada para outros fins, neste trabalho, é focada apenas a vertente do controlo digital do PWM, nomeadamente, no controlo direto da regulação da intensidade de lâmpadas.

3.2.4.2 Controlo de fase

No controlo de fase, tirístores são utilizados como interruptores que interligam o circuito ligado a uma carga com a fonte de tensão CA (corrente alternada) [14]. A tensão alternada de entrada é cortada, com recurso a tirístores, em determinados segmentos do sinal.

O tiristor é ligado durante uma parte de cada meio ciclo, de forma a conectar a fonte de tensão à carga a ser alimentada, sendo desligado durante a restante parte do meio ciclo, desconectando a fonte de CA do circuito da carga.

Desta feita, controlando o ângulo da fase (ângulo de *delay*), regula-se a tensão de saída RMS (valor eficaz) que chega à carga. O ângulo de *delay* é então definido como o ângulo de fase no qual o tiristor liga e a corrente elétrica começa a alimentar a carga.

A fração de meio ciclo em que há condução de corrente pode ser controlada entre 0° e 180° . No entanto, como os tirístores são dispositivos unidirecionais, apenas seria possível regular a carga até 50% da sua potência máxima (condução de corrente em todo o meio ciclo positivo do sinal da fonte CA).

Este possível inconveniente pode ser ultrapassado utilizando juntamente com um tiristor uma ponte de díodos retificadora que converte o sinal CA num sinal unidirecional, ou ainda, por exemplo, a utilização de um TRIAC, um tipo específico de tirístores, que consegue ser acionado de forma bidirecional, ou seja, quer na parte positiva quer negativa do ciclo.

Uma ilustração de ambos os casos pode ser consultada na Figura 3.9, abaixo.

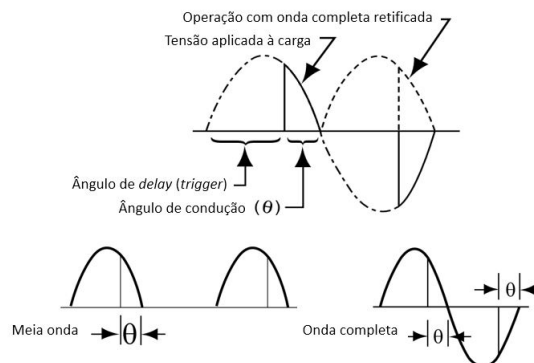


Figura 3.9: Onda sinusoidal representativa do controlo de fase (Adaptado de [15])

3.2.4.3 Regulação de Tensão

A regulação do nível de tensão que se fornece a uma carga pode ser uma alternativa interessante, de acordo com a tecnologia de iluminação à qual se aplique.

Com efeito, na Figura 3.10 é possível constatar a influência que as variações de tensão e corrente desempenham sobre o fluxo luminoso para lâmpadas de iodetos metálicos, vapor de mercúrio, vapor de sódio de baixa pressão e fluorescentes.

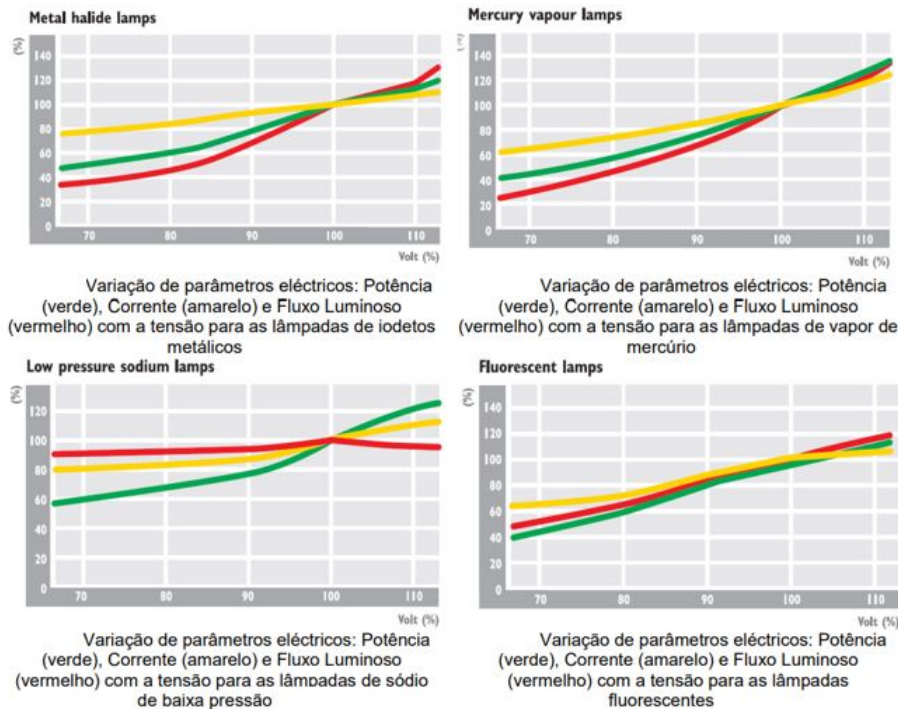


Figura 3.10: Variações de tensão, corrente e fluxo luminoso em diferentes tecnologias de iluminação (Adaptado de [16])

De entre soluções existentes, tem-se, por exemplo, uma tecnologia avançada de elevada eficiência com fácil instalação e manutenção - o regulador Wattguard.

De forma simplificada, este regulador é constituído por um transformador e um conjunto de interruptores, responsáveis por efetuar a escolha do nível de tensão à saída do regulador [16], tal como representado no esquema da Figura 3.11.

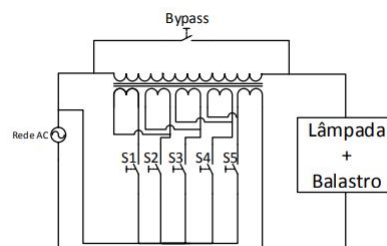


Figura 3.11: Esquema simplificado do regulador de tensão Wattguard (Adaptado de [16])

A redução da amplitude da variação de tensão e intensidade de corrente no circuito elétrico permite não só a regulação da intensidade da iluminação como também consequentes poupanças energéticas. A chave da elevada eficiência relaciona-se ainda com uma característica especial que esta solução incorpora de aceleração dos eletrões envolvidos no processo de emissão de luz.

Esta tecnologia apresenta ainda a vantagem de evitar a necessidade de intervenção nas luminárias e aplica-se sobretudo em tecnologias fluorescentes de iodetos metálicos, vapor de sódio.

Inúmeras outras soluções são facilmente encontradas, como é o caso de [17] que consegue uma redução da tensão fornecida às luminárias até 35 Volts.

3.2.4.4 Injeção de Tensão em Oposição de Fase

Outra técnica que recorre à modificação da tensão a fornecer à carga a partir da tensão da fonte de CA, é a injeção de tensão em oposição de fase [18].

Um transformador, constituído por um enrolamento primário e um secundário com um ou mais pontos intermédios, em conjunto com um sistema de comutação, permite variar a amplitude de um contra-tensão (tensão em oposição de fase) injetada na rede. Esta contra-tensão faz decrescer a amplitude do sinal de tensão de saída que alimenta a carga.

Um esquema simplificado desta técnica é representado na Figura 3.12.

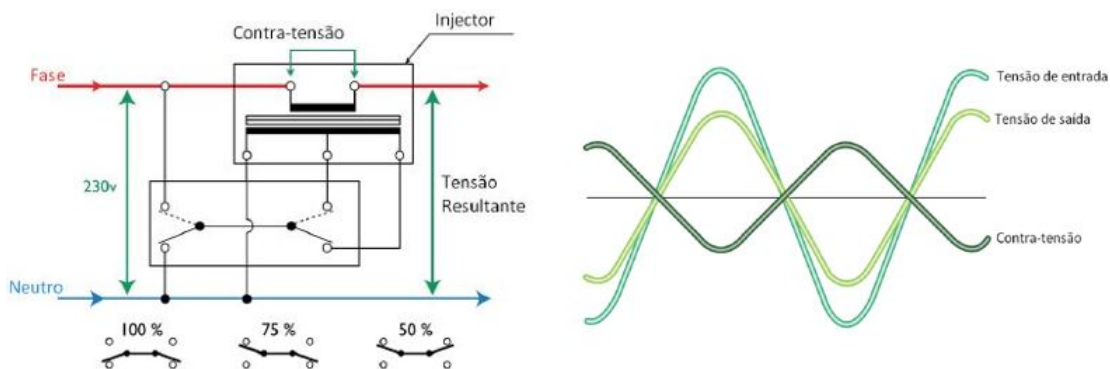


Figura 3.12: Esquema simplificado de um sistema de injeção de tensão em oposição de fase (Adaptado de [18])

Caso o sistema automático de controlo falhe, a tensão à saída mantém-se igual à tensão de entrada.

3.2.5 Protocolos de comunicação

3.2.5.1 Protocolos no âmbito da iluminação

- **DALI - Digital Addressable Lighting Interface**

O protocolo DALI surgiu da necessidade conjunta de vários líderes da indústria da iluminação de criar um sistema de controlo endereçável de dispositivos, comum a todos os fabricantes, e que permitisse uma regulação versátil da iluminação artificial, aplicável a todas as aplicações necessárias [19].

Este protocolo é estandardizado internacionalmente, através da IEC, pela norma IEC 62386. Esta norma define também as características que os equipamentos têm de respeitar para poderem utilizar o protocolo DALI. Tal facto garante a compatibilidade a longo prazo de equipamentos entre diferentes fabricantes, o que representa uma grande vantagem em relação a outros protocolos fechados.

Uma simplificação deste protocolo reside na possibilidade de os cabos de alimentação e de comunicação poderem ser instalados juntos.

Em [20] são explanadas algumas das características principais do sistema DALI, apresentadas de seguida.

– Instalação Elétrica

Uma simplificação deste protocolo reside na possibilidade de os cabos de alimentação e de comunicação poderem ser instalados juntos. Assim, basta um único cabo com 5 fios para ligar os dispositivos do sistema de iluminação. Mais ainda, não há polaridade definida nos cabos de comunicação e controlo, consequentemente, não há, de igual modo, a necessidade de cuidados especiais de identificação destes fios.

Quanto à topologia de ligação, a instalação elétrica pode ser feita em série, em estrela ou numa combinação das anteriores.

– Fonte de Alimentação do Barramento DALI

A alimentação dos dispositivos DALI e a troca de mensagens é feita com o mesmo par de fios.

Normalmente, o controlador DALI não oferece tensão nas linha de comunicação. Neste caso, é necessário uma fonte de alimentação do barramento (PSU). As especificações DALI definem uma tensão nominal de alimentação numa das linhas de 16 Volts e a corrente limitada a 250mA.

A informação é criada e transmitida com o curto-circuito das duas linhas, obtendo assim variações de tensão entre os níveis lógicos baixo - '0' quando as linhas estão em contacto e alto - '1' quando estão separadas.

Um esquema de um sistema DALI é representado na Figura 3.13, abaixo.

– Estrutura de Dados

O protocolo DALI é baseado na codificação Manchester. Com um *baude rate* de 1200 bits por segundo, um controlador DALI consegue enviar diferentes comandos para as luminárias, utilizando a estrutura de dados ilustrada na Figura 3.14.

A primeira parte da mensagem é o endereço da luminária (exceto nos casos em que a mensagem seja enviada em *broadcast*). A segunda parte indica o tipo de comando, terminando depois com a terceira parte, por vezes opcional, com um valor (nível de regulação do fluxo luminoso, por exemplo). Desta forma, um vasto número de comandos pode ser enviado, usando a mesma estrutura. Por cada alteração ou comando é enviada uma única mensagem.

Para permitir comunicação nos dois sentidos entre os dispositivos e o controlador, cada componente necessita de ter um endereço único atribuído. Este processo é realizado uma única vez no início. Posteriormente, e de forma

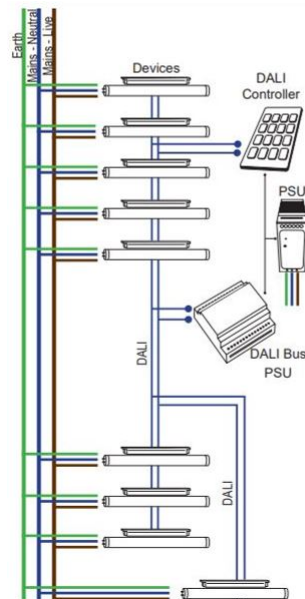


Figura 3.13: Sistema DALI completo com as ligações elétricas (Adaptado de [20])

Endereço (Quem)	Comando (O quê)	Dados (Quanto)
--------------------	--------------------	-------------------

Figura 3.14: Estrutura da mensagem do protocolo DALI

separada, procede-se à configuração dos dispositivos. Cada novo componente adicionado à rede recebe um endereço ainda não utilizado.

O processo anterior poderá não ser intuitivo e ademais necessita de ferramentas especializadas para o efeito.

– Comandos

No controlo dos níveis dos balastos são utilizados quatro modos de endereçamento.

Broadcast - A mensagem é enviada para todos os dispositivos para se ajustarem ao nível enviado (por exemplo, Broadcast 50%)

Channel - A mensagem é enviada para um único dispositivo de cada vez, até um máximo de 64 dispositivos (por exemplo, Channel 2 @ 80%)

Group - Cada dispositivo pode ser atribuído a qualquer de 16 grupos possíveis, podendo estar incluído em mais de um grupo, simultaneamente (por exemplo, Group 3 @ 90%)

Scene - Cada dispositivo pode memorizar até 16 cenários de iluminação diferentes que podem ser ativados com um único comando (por exemplo, Scene 2 Go)

Ora, como por mensagem só pode ser enviado um comando, caso se pretenda atualizar todos os 64 dispositivos com diferentes valores, 64 comandos terão de ser enviados, o que poderá levar até um segundo a completar.

– Regulação do Fluxo Luminoso

Outro aspecto de relevo no controlo DALI é a regulação do fluxo luminoso ser definida segundo uma curva logarítmica entre 0,1% e 100%, em vez de um comportamento linear, conforme representado na Figura 3.15. Desta feita, a alteração da iluminação torna-se mais suave e mais confortável para o utilizador.

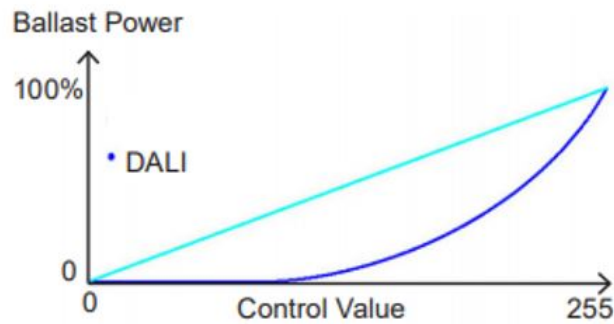


Figura 3.15: Resposta da regulação de fluxo luminoso do sistema DALI segundo uma curva logarítmica (Adaptado de [20])

• ZigBee

O Zigbee é um protocolo estandardizado de comunicação aberto que foi desenvolvido para dar resposta ao controlo de equipamentos sem fios. É baseado na norma IEEE 802.15.4, podendo operar em três bandas de rádio isentas de licenciamento, a banda global de 2.4Ghz e as bandas de 915Mhz (Estados Unidos) e 868 Mhz (Europa) [21].

A taxa de transmissão varia com a banda utilizada, chegando aos 250Kbps com 16 canais disponíveis para 2.4GHz, 40Kbps com 10 canais de comunicação para 915MHz e 1 canal e uma taxa de transmissão de 20Kbps para a banda de 868MHz.

As especificações da rede Zigbee ocupam o seu próprio espaço no universo das redes sem fios, tal como representado na Figura 3.16, abaixo.

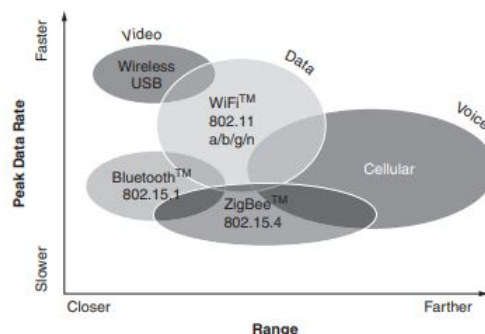


Figura 3.16: Comparação de redes sem fios [22]

Este protocolo tem como mercado-alvo redes de monitorização e controlo sem fios, tendo sido otimizado especificamente para essa área.

– Fiabilidade e Robustez

A fiabilidade da tecnologia Zigbee assenta na intensa procura pela supressão de possíveis falhas que possam ocorrer na comunicação entre dispositivos. Um desses exemplos é o uso de *Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance* (CSMA/CA), que é, no fundo, uma forma de evitar colisões de mensagens. Antes de transmitir, o Zigbee escuta o canal pelo qual pretende transmitir dados e, apenas quando este estiver livre, começa a transmissão [22].

Um CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 16-bit é também utilizado por cada pacote de dados, o que assegura a integridade da mensagem a transmitir [22].

Em caso de falha no envio, as mensagens são reenviadas até quatro vezes, após as quais um alerta é gerado a informar a anomalia.

Outro contributo considerável para a fiabilidade é o uso de, entre outras topologias, uma rede em malha, ilustrada na Figura 3.17, que permite que a informação de um nó consiga ser enviada para qualquer outro nó na rede Zigbee, independentemente da distância, desde que haja nós suficientes entre ambos que reencaminhem a mensagem [22].

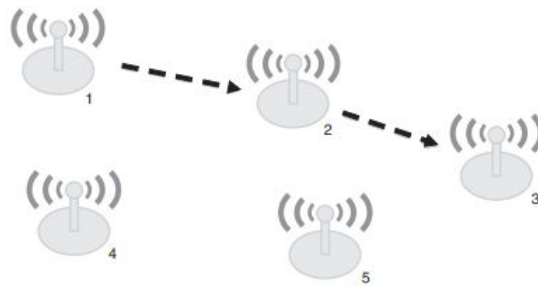


Figura 3.17: Rede em malha do sistema Zigbee [22]

Todavia, caso haja perda de um nó ou uma obstrução física entre os nós, a rede Zigbee tem a capacidade de rotear a mensagem por outros nós até ao destino final, como representado na Figura 3.18.

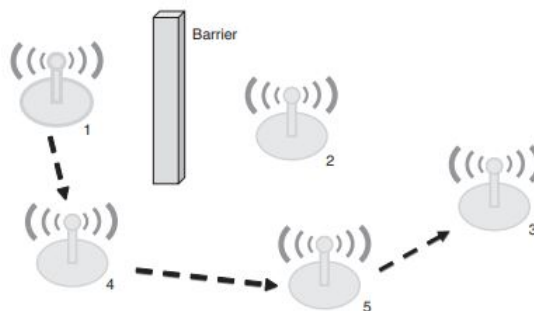


Figura 3.18: Processo de roteamento na rede do sistema Zigbee [22]

Adicionalmente, o sistema Zigbee possibilita *broadcasting* - envio de mensagens para todos os nós - e ainda *multicasting* - envio de mensagens para grupos específicos de nós.

Um último aspeto relevante na fiabilidade do Zigbee é o reconhecimento automático da receção dos pacotes de dados por um determinado nó.

– **Baixo Consumo de Energia**

Dependendo da aplicação em causa, em cenários bem otimizados, os dispositivos podem funcionar durante anos com recurso a pequenas baterias.

Estes consumos de energia reduzidos são obtidos, por exemplo, com a utilização de micro-controladores com a capacidade de "hibernação", uma gestão eficiente de comunicação com a rede e o envio de dados em intervalos de tempo espaçados entre si, exceto em casos de diferentes necessidades.

– **Segurança**

A comunicação Zigbee utiliza a norma de segurança e encriptação AES 128-bit.

Com esta dupla medida de segurança apenas os nós que têm conhecimento da chave de encriptação conseguem ler os pacotes de informação a si destinados e, por outro lado, a injeção de pacotes na rede de comunicação é controlada através de autenticação, evitando intrusões no sistema por terceiros [22].

3.2.5.2 Outros Protocolos

- **Modbus**

Modbus é um protocolo de comunicação utilizado em sistemas de automação industrial.

Por ser um protocolo aberto e por se adequar facilmente a diversos meios físicos (RS-232, RS-485 ou Ethernet), é amplamente utilizado e constitui uma das soluções mais baratas na área da automação industrial, nomeadamente, no controlo de PLC's (*Programmable Logic Controllers*).

O modelo de comunicação é do tipo *master/slave* ou servidor/cliente. Segundo esta arquitetura, um *slave* apenas pode iniciar comunicação no meio físico caso tenha sido requisitado pelo *master* e apenas nos casos em que há dados para enviar como resposta [23].

O *master* pode enviar uma mensagem Modbus em *unicast* (para um único equipamento) ou em *broadcast* (alcançando todos os equipamentos ligados ao barramento).

Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*)

Modbus RTU é um protocolo série (RS-232 ou RS-485), no qual os endereços e valores são representados em formato binário. Um pacote RTU é composto por Endereço (1 byte), Função (1 byte), Dados (comprimento variável) e CRC (2 bytes), conforme a Figura 3.19.

Endereço do Escravo	Código da Função	Dados	CRC
1 byte	1 byte	0 a 252 bytes	2 bytes (CRC-16)

Figura 3.19: Estrutura do pacote Modbus RTU

O primeiro campo da mensagem é o endereço do equipamento MODBUS a quem se destina a mensagem. Por ser codificado com 8 bits, apenas poderiam existir até 255 endereços. Contudo, alguns endereços estão reservados pelo sistema.

Em cada mensagem Modbus tem de ser indicada uma função específica a entregar ao *slave*. Estas podem ser, por exemplo, Escrita ou Leitura das suas posições de memória ou ainda Ativação/Desativação de saídas digitais.

O protocolo Modbus prevê ainda um mecanismo para detetar se a mensagem foi bem transmitida, através do envio de dois bytes adicionais no final da mensagem Modbus. Esses dois bytes são calculados em função de todos os outros bytes da mensagem recorrendo ao CRC 16-bits - Cyclical Redundancy Checking. Se a mensagem tiver sido transmitida corretamente o valor proveniente do CRC calculado pelo recetor é igual ao valor de CRC enviado pelo emissor.

Claras vantagens deste protocolo são identificadas com a fácil implementação e com as reduzidas necessidade de memória para a sua implementação num aparelho programável. Por outro lado, o limitado número de *slaves* e as distâncias máximas de comunicação impostas pelas comunicações série constituem as principais desvantagens.

Modbus TCP/IP

O Modbus TCP/IP tem como meio de comunicação redes de Ethernet e a comunicação entre dispositivos é do tipo master/slave. Assim, os dados são encapsulados em formato binário em frames TCP para a utilização do meio físico Ethernet (IEEE 802.3) [24].

Feita uma conexão entre cliente e servidor, o servidor responde aos pedidos do cliente até que o cliente encerre a ligação.

O número de dispositivos numa rede é alargado significativamente e a comunicação à distância, através da Internet, passa a ser possível. Este tipo de acesso remoto confere não só mais flexibilidade ao sistema, como também facilita a manutenção e diagnóstico de equipamentos.

- **MQTT**

MQTT é um protocolo de transporte de mensagens Publicação/Subscrição assente numa arquitetura publicador/subscritor.

Este protocolo, estandardizado pela OASIS, foi desenvolvido para aplicações em ambientes restritos como a comunicação máquina-para-máquina (M2M) e a IoT (Internet of Things). Trata-se de um protocolo leve e aberto, de fácil implementação (do lado do cliente), otimizado para redes TCP/IP e ideal para sensores e pequenos dispositivos móveis.

- **PUBLICAÇÃO/SUBSCRIÇÃO (Pub/Sub)**

Em alternativa à estrutura tradicional cliente/servidor, no padrão pub/sub o cliente e o servidor nunca comunicam diretamente. Mais concretamente, ambos podem até nem ter conhecimento da existência um do outro, uma vez que todas as mensagens trocadas são geridas por um elemento intermédio - *broker*. A função deste componente passa por filtrar as mensagens enviadas pelos publicadores e distribuí-las corretamente apenas para os respetivos

subscritores. O *broker* pode ser instalado num dispositivo ligado à rede do sistema de controlo e monitorização ou pode ainda estar alojado na Internet em serviços geridos por entidades terceiras [25].

Assim, dissipa-se a necessidade de, por exemplo, os dispositivos publicadores e subscritores encontrarem-se ligados simultaneamente. De igual forma, as operações que estejam a ocorrer em ambos os dispositivos não necessitam de ser interrompidas durante a publicação ou receção de mensagens.

Uma ilustração do conceito do modelo pub/sub está retratada na Figura 3.20.

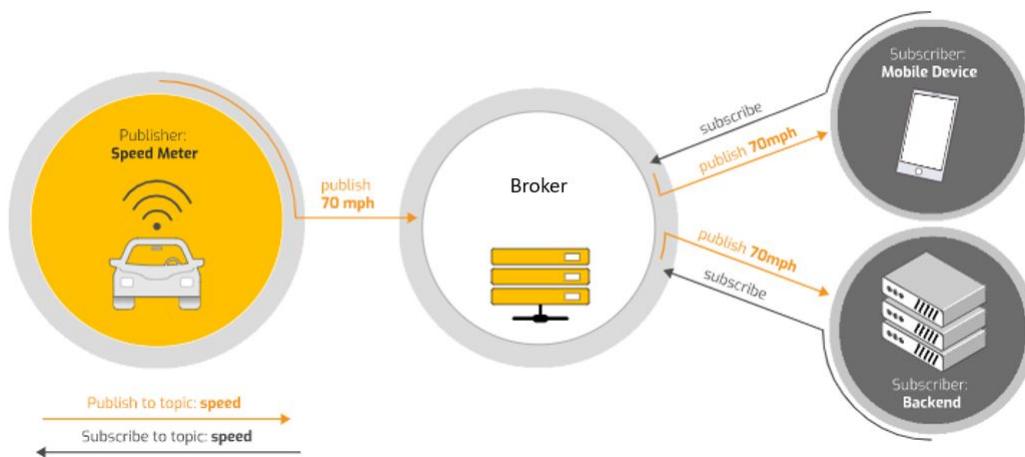


Figura 3.20: Modelo pub/sub (Adaptado de [25])

– MENSAGENS

A forma como o *broker* filtra as mensagens passa pela verificação do tópico de cada uma.

Os tópicos são uma forma de distinguir inequivocamente as mensagens quer a enviar quer a receber. Mais ainda, são definidas por uma única *string* (nível único) ou um conjunto de *strings* (vários níveis) separados por "/". Um exemplo de um tópico pode ser consultado na Figura 3.21.



Figura 3.21: Exemplo de um tópico referente, ao controlo de uma televisão que se encontre na sala de estar de uma habitação

Deste modo, quando um cliente (subscritor) deseja informação de outro dispositivo, envia para o *broker* o tópico que pretende subscrever. Logo que o *broker* receba mensagens provenientes do dispositivo do qual se pretende receber informação, reencaminha a mensagem para o requerente (subscritor). Quanto à troca de informação, todos os dispositivos podem subscrever e publicar mensagens.

Um aspeto a reter com a utilização do modelo pub/sub é a necessidade de se conhecer a estrutura de dados a trocar à priori, uma vez que os dispositivos não comunicam diretamente entre si e o *broker* apenas reencaminha mensagens sem possibilidade de alterar o conteúdo. Um dispositivo publicador não tem forma de reconhecer que o subscritor não está conectado e não recebe a informação [25].

Uma forma de controlar a receção de mensagens num dispositivo é pela definição da persistência da ligação estabelecida e pelo armazenamento da informação até ser possível o seu envio. Caso o *broker* detete a perda de comunicação com algum dispositivo, tem a possibilidade de enviar um alerta.

– ESCALA

O modelo pub/sub é mais facilmente escalável em comparação com o modelo tradicional de cliente/servidor. De entre várias razões estão as operações em paralelo no *broker* e o processamento orientado com base em eventos [25]. Outras vantagens deste modelo é a memorização de mensagens que, por algum motivo, não sejam de imediato entregues aos subscritores e o roteamento inteligente da informação na rede.

3.2.5.3 Sistemas SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

A monitorização de energia na indústria normalmente está associada à monitorização dos processos produtivos. Esta monitorização dos processos é feita na maioria dos casos por software SCADA [24].

O sistema SCADA reúne dados a partir de sensores instalados em equipamentos ou no chão de fábrica, sendo encaminhados para dispositivos centrais onde são processados e registados.

Desta feita, é possível acompanhar em tempo real o estado de um sistema, o que se torna imprescindível para o aumento da eficiência do processo monitorizado. Tomadas de decisão, diagnóstico de falhas, melhorias da gestão de recursos e aumento da competitividade e da produção são apenas alguns exemplos resultantes do emprego destes sistemas de supervisão.

Tendo em vista as vantagens referidas, a adoção de sistemas SCADA rapidamente se difundiu por todos os ramos da indústria, chegando ainda à gestão pública de recursos energéticos, bem como à gestão de energia de edifícios residenciais ou de instalações industriais.

• Movicon

O módulo Pro.Energy© do sistema SCADA Movicon, da Progea, permite a conectividade de um alargado número de medidores de várias formas de energia, a fim de oferecer uma monitorização em tempo real e registo num servidor SQL [26].

A arquitetura do Pro.Energy© permite a ligação com qualquer dispositivo de medição, incluindo ainda conectividade com PLC's. *Drivers* Modbus ou BacNet são também facilmente configuráveis.

Outra vantagem deste módulo é a possibilidade de ligação a aplicações IoT, através de vários protocolos específicos.

Estas características associadas as com a poderosas interfaces gráficas oferecidas pelo Movicon fazem desta uma solução exemplar no controlo e monitorização dos recursos energéticos de uma empresa.

- **Node-Red**

Node-Red é uma ferramenta versátil que permite a interligação de dispositivos físicos, API's (*Application Programming Interface*) e serviços em rede (*online*) [27].

Criada pela IBM, esta ferramenta tem como ambiente de programação um editor no browser e baseia-se em fluxos de informação entre os designados *flows*.

Dentro de um *flow* - imagine-se um *flow* como uma página em branco - é possível criar uma rede de caixas-negras - *nodes*, cada uma programada para desempenhar uma determinada função. Os *nodes* podem ter parâmetros de entrada, saída ou ambos. Neste último caso, a informação que chega é tratada de algum modo e passada para o *node* seguinte. Assim, a informação flui entre os *nodes*, podendo também haver interação entre *nodes* de diferentes *flows*.

Os *nodes* são desenvolvidos pela Comunidade Node-Red, sendo facilmente importados e instalados.

O Node-Red tem como ambiente de execução o Node.js - interpretador de javascript - que permite o desenvolvimento expedito de aplicações e alta escalabilidade, podendo integrar comunicação com um vasto número de dispositivos desde sensores e medidores com diferentes protocolos de comunicação e serviços web simultaneamente. O Node-Red integra, entre outros, interfaces de comunicação via TCP/IP, MQTT e Modbus, permitindo ainda comunicação e interação com base de dados, quer remotas quer locais.

Mais ainda, o Node-Red permite o desenvolvimento de uma interface gráfica que, apesar de um pouco rudimentar, traz a vantagem da monitorização rápida e intuitiva das aplicações desenvolvidas.

Não se tratando de um verdadeiro sistema SCADA, o Node-Red é, não obstante, merecedor de atenção por se tratar de uma ferramenta versátil, compatível com um grande número de dispositivos de medição e controlo. Permite modularidade e escalabilidade num projeto e ainda possibilita uma gestão remota das aplicações desenvolvidas com monitorização e envio de alertas, por exemplo, por email.

Outra grande vantagem desta ferramenta advém do facto de ser leve e aberta, o que permite a sua instalação em equipamentos móveis e de pequena dimensão como o Raspberry Pi ou ainda o Simatic IOT 2020 da Siemens. Adicionalmente, existem ainda vários serviços *online* que oferecem ambiente de desenvolvimento de aplicações IoT, baseadas no Node-Red.

3.3 Monitorização de Ocupação

A deteção e monitorização de pessoas é um tema já muito abordado por diferentes autores no passado. A aquisição da informação relativa à movimentação de pessoas é relevante em muitas áreas, desde a indústria até às áreas residenciais e de serviços, contribuindo para a otimização de aspetos logísticos e comerciais, e ainda, para a promoção do aumento da eficiência energética em edifícios, por exemplo.

3.3.1 Métodos Diretos e Indiretos

As técnicas de deteção de pessoas podem ser divididas em dois grandes grupos, métodos diretos e indiretos [28].

Nos métodos diretos são utilizados dispositivos físicos - sensores - instalados nos edifícios a monitorizar. A exatidão na deteção de ocupação varia em função da complexidade do sistema e dos custos associados à sua implementação. A título de exemplo, o recurso a sensores PIR (*passive infrared sensor*) é bastante frequente quando se pretende controlar a iluminação de um espaço apenas quando há presença humana. Porém, caso uma pessoa permaneça inativa, depois de ter sido detetada, o sistema de controlo de iluminação falhará o seu propósito uma vez que não deteta movimento. Uma forma de contornar estas situações indesejáveis passa pela adição de outros sensores como, por exemplo, de CO₂ ou sonoros. Na verdade, quando se pretende um sistema de deteção fiável, a utilização exclusiva de sensores PIR não se verifica.

Outra forma de monitorizar a presença humana passa pelo uso de identificadores RFID (*Radio Frequency Identification*), como demonstrado em [29]. Esta é uma solução muito utilizada em casos nos quais a segurança, quer de pessoas quer de equipamentos, figura uma preocupação central.

A alimentação, manutenção e calibração dos sensores são também aspetos a ter em consideração neste tipo de metodologia de deteção.

Como regra de bom senso, retém-se que a escolha dos sensores mais adequados não é universal e necessita de ser previamente estudada para cada aplicação em particular.

Nos métodos indiretos, a deteção é conseguida através da análise de informação existente e associada diretamente ao funcionamento de um edifício ou de serviços. Como exemplos dessa informação tem-se os consumos de energia elétrica [30], o tráfego de dados numa rede de comunicação gerida por um determinado router ou ainda a localização de pessoas através dos sinais de GPS dos dispositivos pessoais [31].

Esta abordagem tende a ser menos dispendiosa e menos intrusiva.

3.3.2 Algoritmos de Classificação

Para estimar a ocupação de um espaço ou para detetar a presença humana pode recorrer-se a métodos de *machine learning*. De facto, este tipo de técnicas tem sido aplicado recorrentemente por inúmeros autores e estudos na área da deteção de pessoas, sobretudo em ambientes residenciais, conforme exposto em [32].

A informação proveniente de várias fontes de aquisição de dados é reunida, sendo identificada, e, posteriormente, tratada por algoritmos de classificação supervisionados de *machine learning* que aprendem e identificam os padrões associados à ocupação.

A classificação pode ser binária, em que o output compreende apenas duas classes '0' ou '1', ou pode ainda ser de classe múltipla quando existem mais de duas classes. No que à deteção de ocupação respeita, recorre-se de forma habitual à classificação binária.

3.3.2.1 Support Vector Machines

De entre os algoritmos mais utilizados encontram-se o *Support Vector Machines* (SVM), um algoritmo supervisionado que pode ser utilizado em problemas de classificação ou ainda em problemas de regressão.

Perante um conjunto de dados de treino identificados ("rotulados"), este algoritmo tenta encontrar um hiperplano ótimo que separe os dados em grupos, de tal forma que novos exemplos introduzidos posteriormente possam ser avaliados e categorizados conforme a separação realizada na fase de treino do algoritmo.

Mais concretamente, um hiperplano (Equação 3.1) é um sub-espaço dimensional de ordem $n - 1$ de um espaço dimensional de ordem n . Ou seja, para um espaço 2D, um hiperplano será uma linha, enquanto que para o espaço 3D será um plano.

$$a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n = 0 \quad (3.1)$$

O conceito de hiperplano de separação pode ser ilustrado na figura abaixo, com a representação de diferentes linhas (hiperplanos) que separam duas categorias (uma representada a verde, outra a vermelho). Os eixos do gráfico representam a magnitude das características a avaliar.

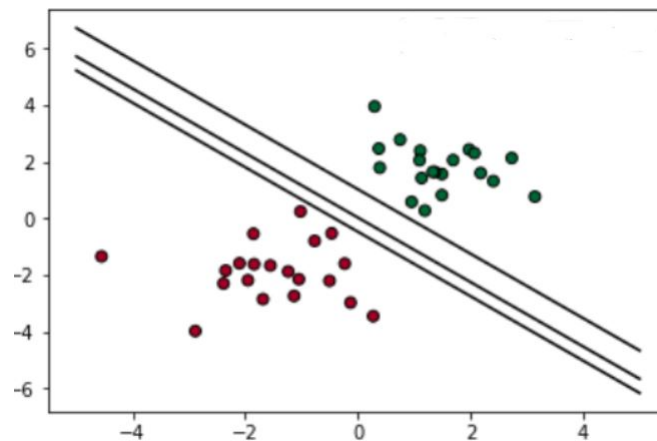


Figura 3.22: Representação de diferentes hiperplanos (Adaptado de [33])

Outro conceito importante é a margem, que é definida como a distância entre os pontos mais próximos do hiperplano (*support vectors*), quer de um lado quer do outro. A linha ótima situa-se a meio da distância máxima que é possível estabelecer entre os pontos vermelhos e verdes, conforme exemplificado na Figura 3.23.

Nas situações em que a separação completa dos casos não pode ser atingida (Figura 3.24), este algoritmo recorre a duas técnicas para tentar otimizar o processo de classificação. A primeira é a suavização da margem, que introduz uma tolerância para o número máximo de classificações erradas aceitável. O algoritmo tenta encontrar o hiperplano que otimize a separação ao mesmo tempo que minimiza o número de classificações erradas.

O grau de suavização da margem, é um parâmetro de configuração do SVM. Na Figura 3.25 pode-se constatar a influência de diferentes valores desta tolerância.

A outra técnica que o SVM implementa para lidar com as situações de separação não linear dos casos é o método do *kernel* através do qual se tenta encontrar fronteiras de decisão não lineares. Este processo é realizado através de transformações aplicadas às características originais, obtendo-se novas que permitem encontrar uma fronteira mais adequada ao pretendido. Os métodos de *kernel* não lineares mais populares são o polinomial (de segunda ordem) e o RBF (*Radial Basis Function*). Alguns exemplos da aplicação deste método estão presentes na Figura 3.26.

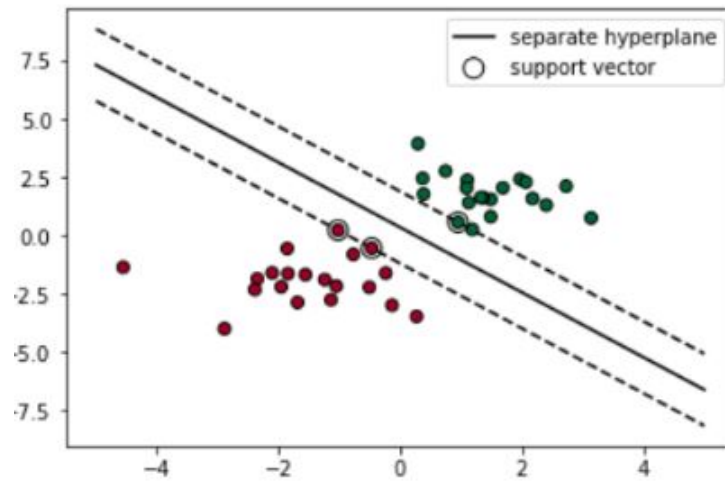


Figura 3.23: Hiperplano e margens de um exemplo com classes completamente separáveis (Adaptado de [33])

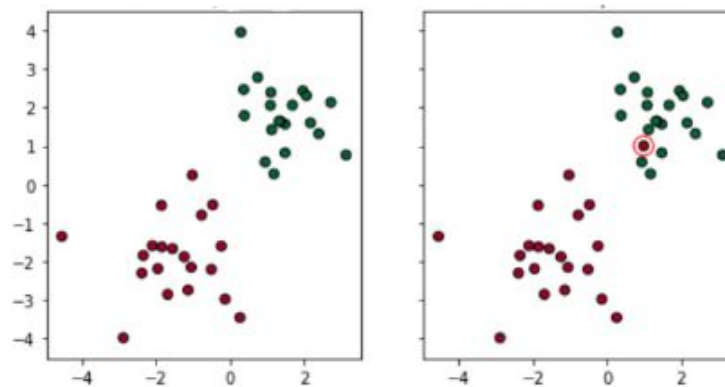


Figura 3.24: Casos de separação linear (esquerda) e não linear (direita) de classes (Adaptado de [33])

3.3.2.2 Decision Trees

Outro algoritmo muito utilizado quer para problemas de classificação quer regressão, é o *Decision Trees* (DT).

Neste, é desenvolvida uma "árvore" (*tree*) de condições (questões) sequenciais acerca das características da amostra em análise, seguindo uma lógica de "Se isto, então aquilo". Cada condição leva à criação de um novo "ramo" (*edge*) até se encontrar uma conclusão (*leaf*) acerca da classe a que pertencerá a amostra inicial.

O crescimento da árvore é dependente das características a ter em consideração, das condições que se devem formular nas ramificações e ainda do ponto de paragem de crescimento.

A decisão de ramificação tende a seguir a ramificação que minimize uma função de custo. Esta função pode, por exemplo, procurar ramos o mais homogêneos possível ou ainda ramos constituídos por grupos com respostas similares.

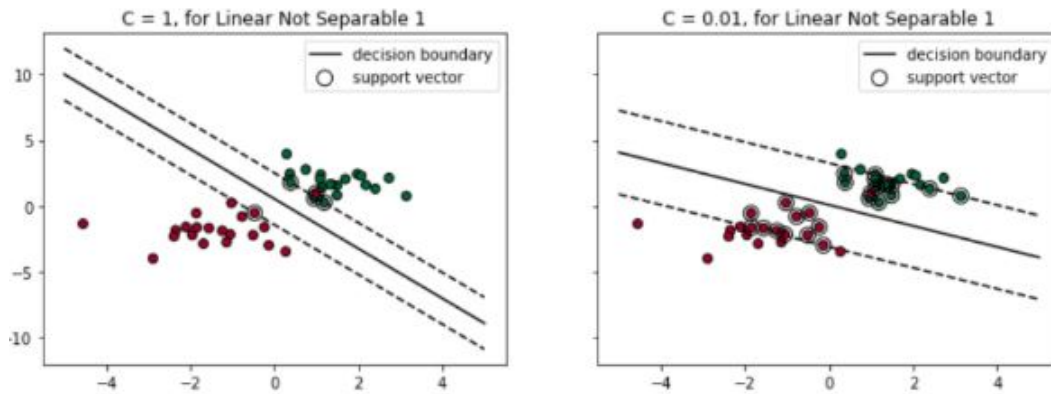


Figura 3.25: Consequências dos diferentes valores de suavização da margem - parâmetro "C" (Adaptado de [33])

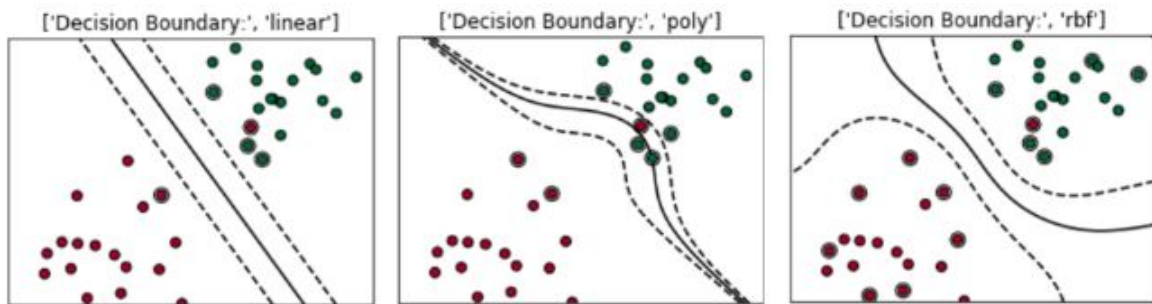


Figura 3.26: Diferentes tipos de fronteiras de decisão correspondentes aos métodos de *kernel* linear, polinomial e rbf, respetivamente (Adaptado de [33])

Uma preocupação resultante da utilização de *Decision Trees* isoladas é o risco de haver muitas ramificações que podem levar a um *overfit* - ajustamento excessivo do algoritmo aos dados introduzidos na fase de treino. Para evitar este problema, é essencial controlar o crescimento da árvore. Uma forma de o fazer passa por definir um número mínimo de opções possíveis para cada conclusão (*leaf*), ignorando as restantes (diminuindo assim o número as possibilidades de ramificação). Outra forma será definir a profundidade máxima atingível pelo modelo (comprimento máximo do início da árvore até uma conclusão *leaf*).

Um algoritmo mais robusto e que contraria a variância elevada que pode ocorrer nas *Decision Trees* será o *Random Forest*. Este algoritmo baseia-se num conjunto de *Decision Trees* cujos resultados individuais vão a votos a fim de se obter uma decisão final para classificar a amostra. Desta feita, as características a avaliar devem ser escolhidas da forma o mais aleatória possível para evitar correlações elevadas entre as diferentes *Decision Trees*.

Diferentes modelos e respetivas aplicações são discutidos em [32].

3.3.2.3 Avaliação dos Algoritmos

O processo de ajustamento dos parâmetros dos algoritmos assume-se crucial para se obter um modelo de previsão o mais ideal possível. Nesta fase de ajustamento os dados são divididos em dois grupos. O primeiro grupo é dedicado ao treino do algoritmo para obter os parâmetros ótimos que garantam melhores prestações e evitem fenómenos como *overfit*. Já o segundo grupo é utilizado para testar e validar o modelo gerado, com a classificação de amostras novas.

Os principais métodos de avaliação do desempenho dos algoritmos consistem na consulta da matriz de confusão e dos parâmetros *precision* e *recall*. Uma matriz de confusão é constituída por uma tabela na qual é possível consultar quantas previsões corretas foram efetuadas pelo algoritmo e quantas foram as incorretas (e de que modo), conforme a Figura 3.27.

		Previsão	
		Positivo	Falso
Realidade	Positivo	Nº verdadeiros Positivos - TP	Nº falsos Negativos - FN
	Falso	Nº falsos Positivos - FP	Nº verdadeiros Falso - TF

Figura 3.27: Matriz de Confusão

Em relação à *precision*, esta é calculada segundo a seguinte fórmula,

$$PositivePredictedValue = TP / (TP + FP)$$

indicando que proporção de identificações positivas estão efetivamente corretas. Já o *recall* calcula-se como

$$TruePositiveRate = TP / (TP + FN)$$

que traduz a proporção de verdadeiros positivos que foi realizada corretamente.

3.4 O Ar Comprimido

O ar comprimido é uma das formas de energia mais utilizada na indústria transformadora e uma das mais economicamente dispendiosas de produzir.

Segundo [34], devido à versatilidade de aplicações e garantias de produção, o ar comprimido é amplamente utilizado na indústria, sendo considerado como uma das fontes energéticas mais importantes no setor industrial.

O ar comprimido deve ser encarado como uma forma de energia que deve ser utilizada racionalmente de modo a rentabilizar o processo produtivo.

Apesar de se tratar de uma matéria prima gratuita (o ar atmosférico), durante o seu tratamento até à fase de utilização, tem associados custos provenientes de vários componentes, de entre os quais se destacam os motores elétricos na unidade compressora. Um dos principais contribuintes para uma fraca competitividade industrial é, muitas

vezes, a fatura energética de sistemas de ar comprimido mal dimensionado ou com manutenção ineficiente. O preço a pagar é comumente encoberto pelas baixas margens de lucro, levando os empresários a descuidar a importância da manutenção da rede de ar comprimido.

Para a maximização do rendimento da rede de ar comprimido dois aspetos são fundamentais, o capítulo da manutenção e o capítulo do dimensionamento e controlo.

Dentro do capítulo da manutenção, vale a pena uma breve referência à importância do controlo e monitorização e eliminação das fugas. Segundo [35], podemos verificar as potências requeridas para sustentar fugas de ar em função das suas dimensões. Estas quantificações são bastante ilustrativas da importância de uma manutenção ativa das redes de ar comprimido, tendo em conta que o consumo das fugas de ar é contínuo.

Centrando a atenção na parte do controlo, apresentam-se, de seguida, os diferentes tipos de equipamentos compressores, bem como as respetivas particularidades e descrições de funcionamento.

A abordagem do tratamento do ar comprimido produzido, da filtragem e secagem e das redes de distribuição será remetida para segundo plano, atendendo aos objetivos propostos neste projeto e ainda ao facto de o sistema de ar comprimido instalado na Atena - Automação Industrial já contemplar estes cuidados.

3.4.1 Compressores

Os principais tipos de compressores distinguem-se em dois grandes grupos: compressores dinâmicos e compressores volumétricos. A representação dos dois tipos está presente na Figura 3.28.

3.4.1.1 Compressão Dinâmica

Os compressores dinâmicos operam em velocidades de funcionamento superiores às dos compressores alternativos. Estas unidades compressoras podem ser Centrífugas ou Axiais.

- **Compressores Centrífugos**

Neste tipo de compressor, a designação advém da compressão se processar perpendicularmente ao veio motor e a descarga do ar efetuar-se segundo a tangente ao raio das pás impulsoras. Na indústria, operam geralmente à volta de 20 000 rpm existindo, no entanto, aplicações onde velocidades superiores são exigidas, como é o caso das indústrias Aeronáutica e Espacial, por exemplo, onde as unidades Centrífugas podem operar entre 50 000 a 100 000 r.p.m. Este tipo de unidade compressoras é também indicada para a produção de ar isento de óleo, exigindo caudais relativamente elevados.

- **Compressores Axiais**

No caso dos compressores axiais, a compressão do ar processa-se paralelamente ao veio motor. O recurso a este tipo de compressor para a produção de ar comprimido tende a ser pouco frequente, consequência de o caudal de ar mínimo necessário ser bastante elevado (900 m³/min).

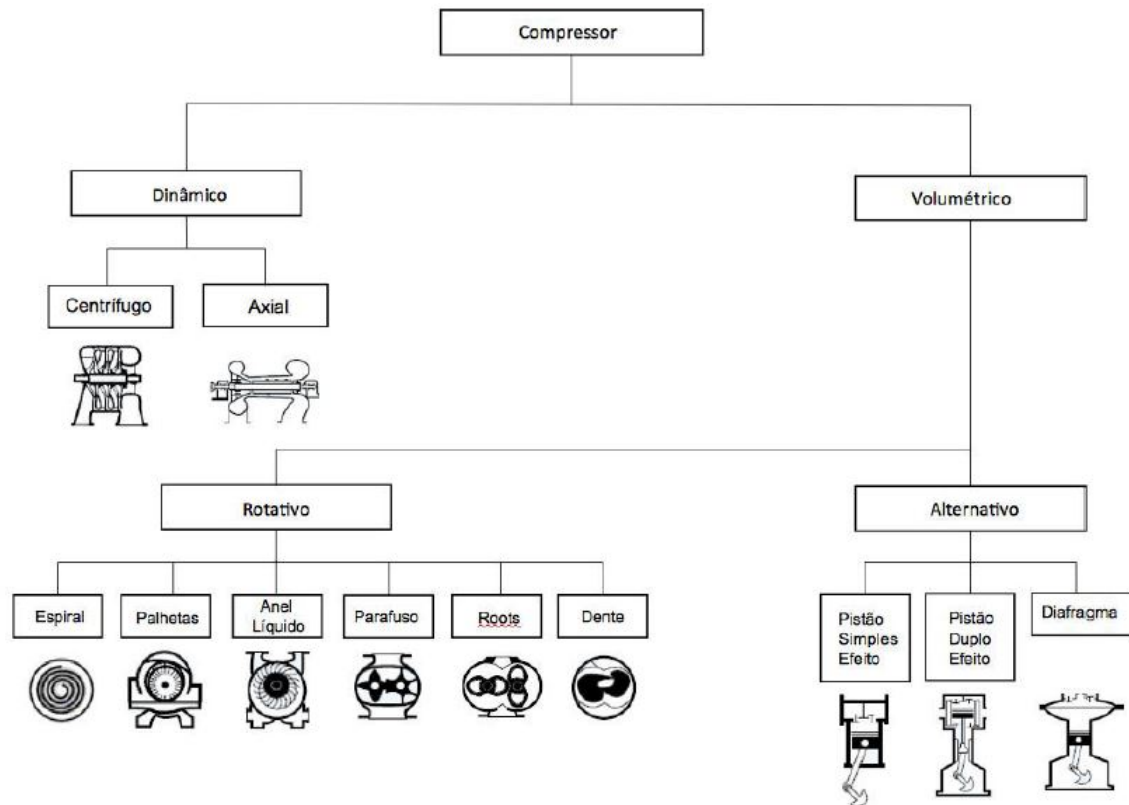


Figura 3.28: Tipos de compressores [36]

3.4.1.2 Compressão Volumétrica

Nos compressores volumétricos, o ar é admitido numa ou mais câmaras de compressão onde o seu volume é reduzido, originando o aumento de pressão pretendido. Este tipo de compressão compreende dois grupos de compressores - alternativos e rotativos.

- **Compressores Alternativos**

Os compressores volumétricos alternativos podem ser de pistão simples, pistão duplo ou diafragma. Apesar de serem os mais eficientes, são maiores, mais ruidosos e mais caros, em comparação com compressores volumétricos rotativos, motivos pelos quais têm vindo a ser substituídos por estes últimos. No entanto, continuam a ser a escolha preferencial para pressões superiores a 14 bar ou para uso como compressor de processo (por exemplo, num caso em que se pretenda 50 m³ a 200 bar) [35].

- **Controlo de Débito**

Os parâmetros de controlo neste tipo de compressor são definidos através de um diferencial de pressões, sendo obtido de duas formas distintas: Para/Arranca e Carga/Vazio.

No caso do controlo **Para/Arranca**, o compressor opera até que a pressão do ar armazenado atinja um valor máximo previamente definido num pressostato. Uma vez atingido esse valor, o compressor para automaticamente (o motor

elétrico desliga-se). De forma análoga, o compressor arranca assim que um valor de pressão mínimo seja atingido.

A aplicação deste tipo de regulação está por norma limitada aos compressores mais pequenos, com potências até 11kW (15cv). Por razões relacionadas com a segurança, bem como por preocupações energéticas, quando a potência dos compressores excede 11kW, opta-se por outro tipo de controlo alternativo ao Para/Arranca: o controlo Carga/vazio.

Na regulação de **Carga/Vazio**, o motor elétrico fica ligado ininterruptamente, mesmo que o compressor não se encontre a comprimir ar. Mais concretamente, assim que a pressão no reservatório atinja um valor máximo, o compressor deixa de comprimir ar por ação de uma válvula piloto (pneumático-mecânica) que obriga a abertura permanente das válvulas de admissão de ar, até que a pressão mínima previamente definida seja atingida. Nesta situação, o compressor encontra-se em regime vazio. Logo que o valor de pressão mínima seja detetado, o compressor passa ao regime de plena carga (volta a comprimir ar). Este tipo de controlo permite a poupança de energia com a redução de arranques e paragens do motor elétrico ao longo do tempo, que teriam maiores impactes no consumo energético comparativamente aos que se registam com o funcionamento em contínuo do motor.

- **Compressores Rotativos**

Os compressores rotativos possuem a gama mais alargada do tipo de tecnologia de compressão - espiral, palhetas, anel líquido, parafuso (isento de lubrificação ou lubrificado) e roots. O seu baixo custo inicial, assim como manutenção mais fácil, e o facto de serem mais compactos, são fatores que explanam a utilização mais frequente do compressor rotativo de parafuso dentro do grupo de compressores volumétricos rotativos, podendo ser arrefecidos a ar ou a água [36].

- **Controlo de Débito dos Compressores Rotativos de Parafuso**

O **Controlo por Modulação** adequa-se se a consumo de ar comprimido quando estes estiverem continuamente próximo dos 100%, ou com pequenas variações [35].

A pressão constante à saída da unidade compressora é atingida com a regulação contínua da posição da válvula de admissão de ar.

Por ser assim, se houver variações consideráveis da sua capacidade, este método deixa de ser indicado por induzir de um vazio muito grande, podendo ser necessário descarregar para a atmosfera o excesso de ar, a fim de manter a pressão de saída constante.

O **Controlo por Carga/Vazio** é o mais utilizado em instalações com consumos irregulares de ar comprimido.

Neste sistema, o ar é comprimido para um reservatório central, entre duas pressões estabelecidas. Quando a pressão máxima desse intervalo é atingida, o regime de carga é interrompido com o fecho da válvula de admissão. Neste instante entra-se no regime vazio, no qual o motor elétrico mantém o seu veio a rodar. Apenas não há compressão pela válvula de admissão se encontrar fechada.

Com o consumo de ar, a pressão vai diminuindo, fazendo ativar o regime de carga assim que o valor da pressão no reservatório atinja o mínimo.

O tempo de regime em vazio é regulável em função dos requisitos da rede. Por vezes, se a ausência de consumo de ar for prolongada, torna-se mais vantajoso desligar o motor do compressor.

O **Controlo por Variação da Frequência** adequa-se a sistemas que exigem consumos de ar bastante irregulares.

A variação do motor do compressor varia em função das necessidades de ar comprimido, adaptando-se assim às flutuações do consumo. O controlo da velocidade do motor elétrico é feito a partir da variação da frequência da corrente fornecida.

Por se tratar de um dos mais dispendiosos métodos de controlo, deve, antes de mais, existir uma fundamentação clara acerca da necessidade efetiva desta tecnologia. Se assim não for, o recurso a este tipo de controlo pode induzir perdas energéticas e, conseqüentemente, económicas.

3.4.2 Redes de Ar Comprimido e respetiva Manutenção

Uma rede de distribuição de ar comprimido deve ser projetada para garantir um baixa queda de pressão entre compressores e pontos de consumo, minorar e evitar fugas de ar e, incluir, preferencialmente, equipamentos de tratamento de ar.

Em redes de distribuição extensas, deve-se considerar a divisão em vários setores. Para tal, a rede de ar deverá ter instaladas válvulas de corte, permitindo assim isolar partes do sistema sempre que necessário. Uma dessas ocasiões poderá ser a realização de inspeções ou ainda operações de manutenção [36]. Aqui, a utilização de eletroválvulas assume especial interesse por permitir um controlo e uma monitorização remotos.

Dentro do capítulo da manutenção vale a pena uma breve referência à importância do acompanhamento constante e de um controlo rigoroso da rede de ar comprimido.

Em [35], são discutidos os elevados custos económicos associados às fugas de ar em função das dimensões das mesmas. As quantificações dos consumos energéticos desperdiçados são bastante ilustrativas da importância de uma manutenção ativa das redes de ar comprimido, tendo em conta que o consumo das fugas de ar é contínuo.

As principais fontes de problemas encontram-se nos acoplamentos de máquinas à rede de distribuição do ar, nos equipamentos pneumáticos utilizados nestas máquinas, e nos acoplamentos de mangueiras, adaptadores, uniões de tubos e engates rápidos.

Quando um sistema de ar comprimido não possuir equipamentos de tratamento (secadores, filtros) na sua central de produção, devem ser tidas em conta algumas regras durante a instalação da rede de distribuição, referidas em [36].

3.4.3 Soluções de Controlo e Monitorização de Ar Comprimido Industrial

Para implementar e seguir uma estratégia de eficiência energética num sistema de ar comprimido, é imprescindível conhecer o perfil de consumos da instalação. Um registo temporal representativo da realidade dos consumos permitirá simular cenários de melhoria e identificar anomalias.

Segundo [34], os sistemas de monitorização devem garantir em tempo real uma operação dentro dos limites estabelecidos, permitindo identificar os desvios significativos.

De modo a fazer a monitorização de sistemas pneumáticos, vários fabricantes oferecem diferentes soluções como, por exemplo, o Smart Pneumatics Monitor da Aventics [37].

Parte II

Solução Proposta

Capítulo 4

Descrição geral da solução proposta

Após uma cuidada análise do Estado da Arte apresenta-se neste capítulo a abordagem seguida e os vários aspetos tidos em consideração para a implementação do projeto.

4.1 Caracterização da solução

Como preocupação inicial, procurou-se identificar as características centrais que a solução proposta deve contemplar.

Neste sentido, enumera-se de seguida, um levantamento generalista dos aspetos a incluir no projeto. Em suma, a solução deve:

- **Permitir o controlo e monitorização da iluminação**

De facto, a necessidade de haver um controlo mais eficaz sobre a iluminação é muitas vezes flagrante, registando-se luminárias ligadas durante períodos do dia em que tal não se justifica. Por igual motivo deve ainda haver a possibilidade de monitorizar o estado corrente e os dados históricos da iluminação, bem como dos consumos energéticos associados.

- **Monitorizar o consumo de ar comprimido**

Uma vez que a empresa possui já um compressor de parafuso que apresenta a maior eficiência energética possível, como visto anteriormente, o seu controlo não representa, nesta fase, uma preocupação. Pretende-se, no entanto, conhecer os perfis de consumo de ar comprimido. Por conseguinte, a solução proposta deve garantir a monitorização remota destes consumos.

- **Garantir um controlo da iluminação por zonas**

Uma arquitetura de gestão por zona justifica-se pela ocupação não uniforme do chão de fábrica, havendo zonas de trabalho com perfis horários de utilização distintos.

- **Seguir uma estratégia de controlo da iluminação baseada em níveis de luminosidade**

Por se tratar de um espaço industrial amplo e se registar movimentos constantes de materiais e pessoas, a estratégia de controlo da iluminação baseada em níveis de luminosidade figura a estratégia mais adequada. Tentar detetar a ocupação real no chão de fábrica revelar-se-ia uma tarefa árdua e passível de falhas. De forma análoga, a implementação de uma estratégia baseada na luminosidade constante seria muito difícil de seguir, desde logo pelo facto de os portões dos pavilhões revelarem um padrão de abertura e fecho inconstante, havendo variações consideráveis de luz natural ao longo dos dias.

- **Possuir um carácter modular**

A solução proposta deve prever uma arquitetura modular sobre a qual se possa adicionar ou remover módulos sensoriais ou de controlo. Isto é, o sistema mantém a completa integridade e o funcionamento, mesmo que sejam adicionados mais sensores para adquirir informação em falta, por exemplo, ou ainda, em caso de falha de algum módulo.

- **Funcionar autonomamente mas possibilitar intervenção humana**

A solução proposta deve ainda funcionar autonomamente, de acordo com as instruções dos utilizadores. No conjunto global destas instruções encontram-se os horários de funcionamento e os *thresholds* para ligar/desligar a iluminação, por exemplo. Após introdução dos parâmetros de funcionamento, o sistema deve então desempenhar as funções atribuídas sem necessidade de supervisão humana. No entanto, caso se pretenda, o utilizador deve conseguir assumir o controlo do sistema de forma manual. Acresce ainda a importância de garantir, sempre, um controlo manual da iluminação em caso de falha catastrófica do sistema de controlo autónomo.

- **Ser pouco dispendiosa e permitir uma fácil instalação/manutenção**

Outro fator importante que se deseja atingir passa por garantir baixos custos de instalação. Por outro lado, a instalação e manutenção devem ser pouco trabalhosas, retirando o máximo partido das vantagens da arquitetura modular.

- **Reunir toda a informação numa única interface**

Quanto ao acesso à supervisão e ao controlo, estes devem ser acessíveis através de uma única interface intuitiva que possa ser consultada por vários utilizadores em simultâneo. O estado das diferentes variáveis do sistema, os consumos energéticos e os comandos manuais são alguns dos exemplos que devem constar nesta interface.

- **Permitir o acesso remoto**

Por último, a solução proposta contempla ainda a acessibilidade através da *internet*, atribuindo ao controlo do sistema um carácter verdadeiramente remoto.

4.2 Arquitetura da solução

A arquitetura da solução proposta está representada na Figura 4.1.

Distribuídos pelo chão de fábrica encontram-se diferentes módulos sensoriais. Estes módulos (M1 a M3) adquirem a informação necessária reportando os dados para o

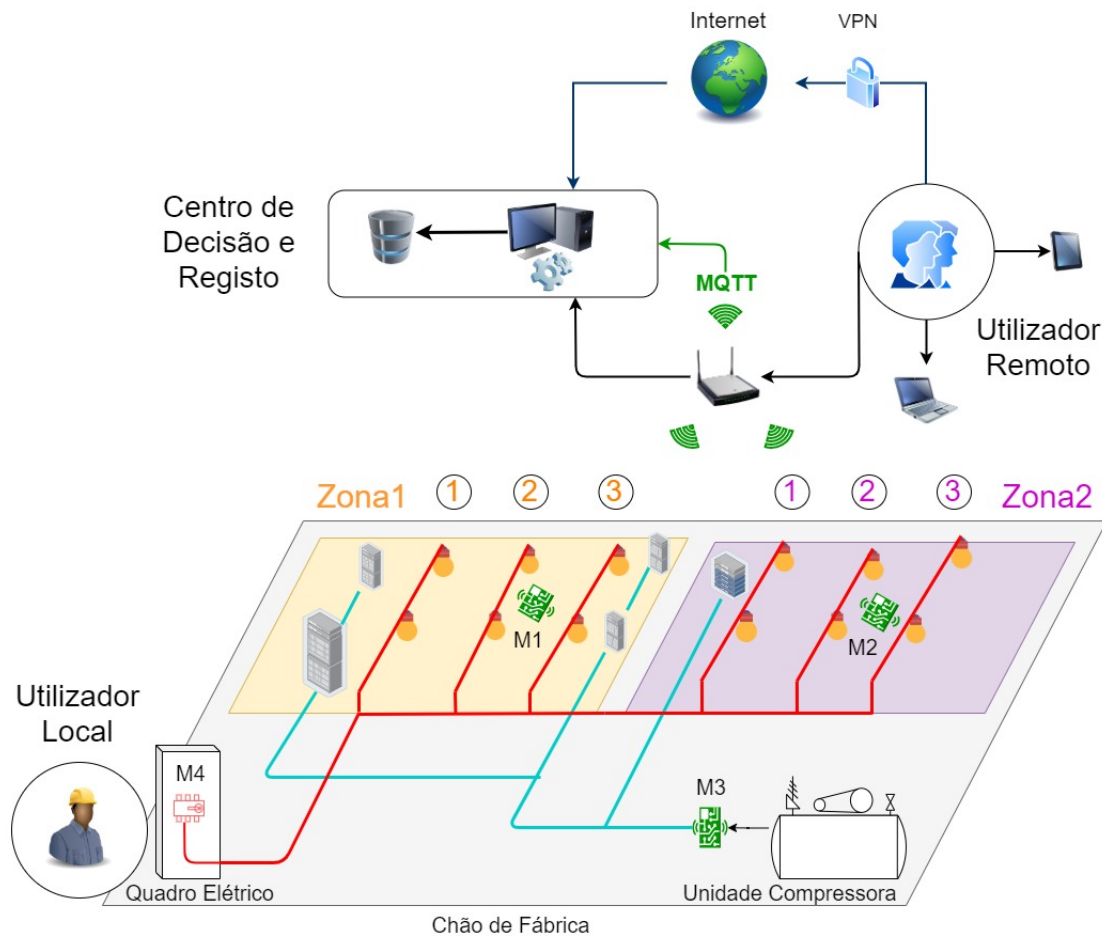


Figura 4.1: Arquitetura da solução proposta

módulo central designado por Cento de Decisão e Registo (CDR). Este módulo central desempenha, assim, o papel de um servidor, sendo responsável pela implementação dos algoritmos de controlo, alojamento da base de dados onde são registados todos os dados relativos ao sistema, bem como pela criação da interface de acesso.

Os módulos M1 e M2 possuem sensores de luminância. Já o módulo M3 é constituído por um caudalímetro responsável pela medição do volume total acumulado de ar comprimido consumido. Aos respetivos sensores acrescem ainda módulos de comunicação sem fios.

Módulos de controlo (M4) são também utilizados para atuar sobre a iluminação. Estes cumprem a função de ligar/desligar a iluminação, em função dos comandos enviados pelo CDR e encontram-se em quadros elétricos parciais dedicados a este projeto.

Os vários dispositivos (M1 a M4) comunicam com o Centro de Decisão e Registo, dentro de uma rede de comunicação sem fios (WLAN) através do protocolo de comunicação MQTT. O *broker* está também instalado no CDR.

Para aceder ao sistema, os utilizadores devem ligar-se à rede WLAN dedicada ao sistema dentro da empresa, acedendo depois à interface alojada no CDR, como referido anteriormente, ou podem ainda aceder via *internet* com o estabelecimento de uma VPN (*Virtual Private Network*), por questões de segurança.

Para além disso, a atuação manual sobre o controlo da iluminação pode ser feita no quadro elétrico parcial mencionado acima.

4.3 Base de Dados

Quanto ao registo da informação acerca do estado do sistema pretende-se que este seja efetuado numa base de dados para análises futuras do desempenho do sistema, identificação de melhorias ou ainda para auxiliar a resolução de eventuais falhas dos algoritmos.

Tendo em conta que o tipo de controlo será realizado por zonas, cada uma destas terá associada a si uma tabela com um horário de funcionamento e uma outra que inclui o estado dos comandos, as condições de luminosidade entre outros fatores respetivos daquela zona. Desta forma, tem-se acesso a todas as variáveis e comportamento do sistema referente a uma determinada zona isoladamente das restantes.

Para além das tabelas referentes especificamente a cada zona, pretende-se também criar tabelas com os históricos das configurações gerais do sistema, como são exemplo os níveis de luminosidade ou ainda criação de eventos excecionais ao normal funcionamento do sistema.

Por fim, serão também criadas tabelas com os registos dos consumos de ar comprimido a fim de ser possível apresentar os perfis de consumo em diferentes escalas temporais (anual, mensal, semanal).

4.4 Regulação do Fluxo Luminoso

Retirando partido da capacidade de fluxo regulável que as luminárias apresentam, propõem-se também um módulo de regulação de fluxo luminoso, recorrendo à técnica de PMW.

Mais precisamente, este módulo, alimentado com 24V, tem 2 sinais de saída CC, de 0-10V: o primeiro provém da geração de um sinal de PWM, cujo *duty cycle* varia em função dos níveis de luminosidade registados; o segundo será obtido com a utilização de uma resistência elétrica ajustável (potenciômetro) controlada manualmente por um utilizador.

Assim, o sistema de controlo da iluminação estará preparado para regular o fluxo luminoso proveniente das luminárias, de forma autónoma, sendo possível, no entanto, realizar essa tarefa manualmente (Figura 4.2). As regulações autónoma e manual não atuam simultaneamente.

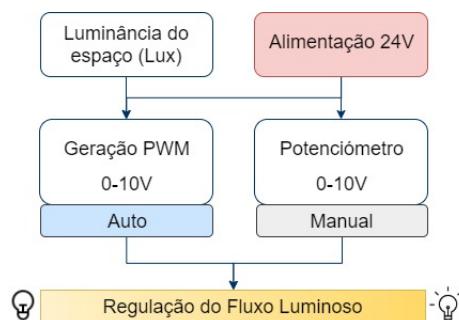


Figura 4.2: Proposta do módulo de regulação do fluxo luminoso

4.5 Monitorização de Presença

O modelo de controlo da iluminação até aqui abordado é referente ao chão de fábrica.

Todavia, existem outras zonas de interesse com necessidade de intervenção, no sentido de se tentar promover uma maior eficiência da utilização dos recursos energéticos.

Dentro da empresa, estas zonas são compostas sobretudo por escritórios e salas de reuniões. Os perfis de utilização destes espaços apresentam características distintas daquelas apresentadas pelo chão de fábrica. Aqui, devido a um movimento regular de pessoas entre divisões, a iluminação permanece recorrentemente ligada apesar da ausência prolongada dos ocupantes.

Ao controlo e utilização muitas vezes ineficiente da iluminação, acresce ainda o desperdício energético associado ao sistema de ar condicionado, registando-se, igualmente, o funcionamento destes equipamentos em espaços desocupados.

Neste sentido, torna-se pertinente abordar a temática da deteção de presença humana que possa contribuir para a mitigação dos desperdícios energéticos nestas zonas.

Desta feita, propõem-se a comparação e validação de dois métodos de deteção distintos, designadamente, um método direto e outro indireto, cuja arquitetura se expõe na Figura 4.3.

No método de deteção direto, várias seriam as possibilidades disponíveis. Contudo, algumas podem ser excluídas logo à partida, como são exemplo, os sensores de CO₂, uma vez que as janelas para o exterior são abertas com regularidade ou ainda sensores de som, também pelo motivo anterior e pelo facto de as divisões entre escritórios e salas serem envidraçadas (maus isolantes acústicos). Os sensores PIR são outra alternativa que apresenta igualmente desvantagens claras na deteção da presença de pessoas numa zona de escritórios. Uma vez que estas se encontram, muitas vezes, praticamente imóveis ou com movimentos muito restringidos, o emprego deste tipo de sensor poderia revelar-se improfícuo. Aplicações mais adequadas aos sensores PIR são sobretudo zonas de passagem de pessoas, como corredores ou escadas, por exemplo.

Para realizar a experiência de deteção propõe-se a utilização de sensores de deteção de objetos para realizar um sistema de contagem de pessoas que entrem num espaço (M5 e M6).

Já como método indireto, pretende-se retirar partido das medições dos consumos energéticos dos espaços em causa, utilizando parte dessa informação para detetar a presença de utilizadores. Em conjunto com esses dados de energia e potência acresce ainda a deteção de pessoas pela contagem de dispositivos com o WiFi ligado que se encontrem na zona. Opta-se por estes dois parâmetros de deteção - consumos de energia elétrica (medidos com os módulos M1 e M2) e número de dispositivos com WiFi detetados (com os módulos M3 e M4) - pelo facto de ser comum a utilização de computadores portáteis que possuem WiFi, encontrando-se sempre ligados à rede interna da empresa, e por estes acompanharem muitas vezes os respetivos utilizadores. Mais ainda, é igualmente recorrente ligar estes equipamentos portáteis às tomadas das salas ou escritórios.

A comunicação entre os vários módulos e o Centro de Decisão e Registo é realizada via MQTT.

A partir da informação recolhida, a classificação entre presença e ausência será realizada com recurso a algoritmos de classificação binária de *machine learning*, designadamente os algoritmos SVM e *Decision Trees*.

Pretende-se, com esta solução, identificar a metodologia mais adequada à resolução

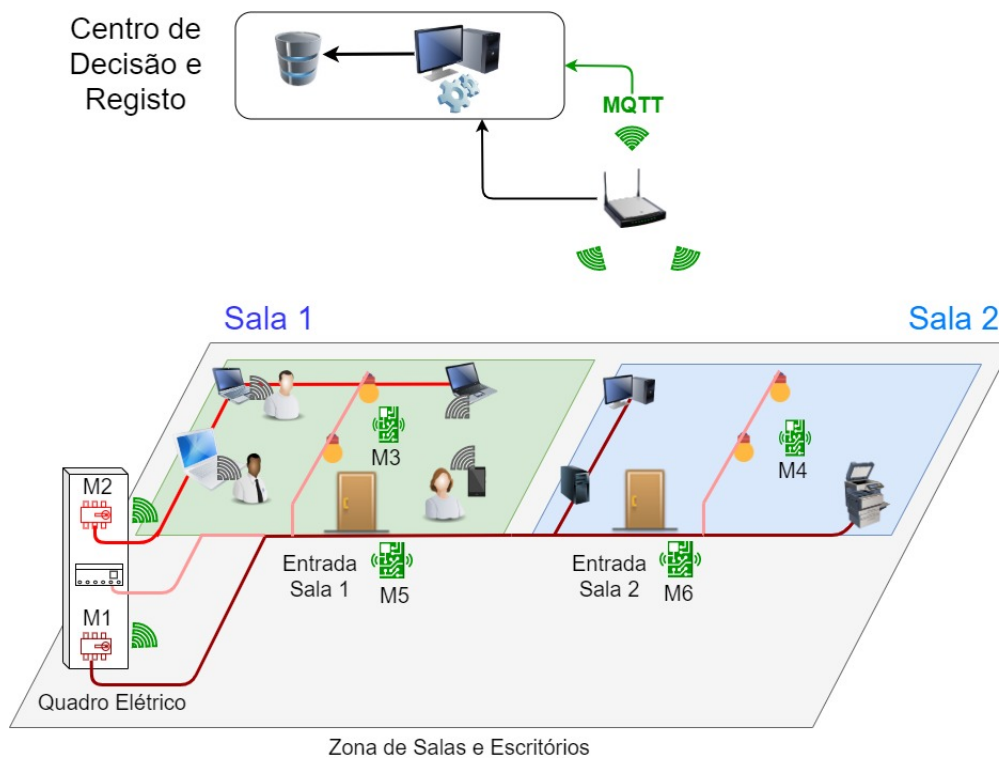


Figura 4.3: Arquitetura da proposta do módulo de detecção de presença

da problemática de detecção de presença humana nas zonas em causa.

Capítulo 5

Implementação da solução

Após a caracterização da solução concluída, prossegue-se seguidamente, para a sua implementação. No presente capítulo, apresenta-se o trabalho desenvolvido, nomeadamente, o hardware utilizado e os algoritmos desenvolvidos, bem como as devidas fundamentações que explanam o seu emprego.

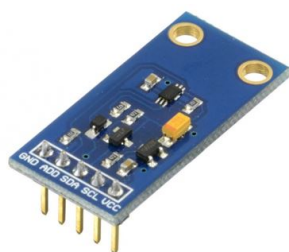
5.1 Hardware

5.1.1 Monitorização da Luminosidade

A monitorização das condições luminosas é uma ação central no sistema de controlo da iluminação, uma vez que, este assenta sobre uma estratégia de controlo baseada em níveis de luminosidade.

A fim de se obter valores de luminância, recorre-se a sensores de luminosidade BH1750 (Figura 5.1-a). A comunicação com este sensor é realizada através de interface I2C. Os dados recebidos por este sensor encontram-se já em Lux.

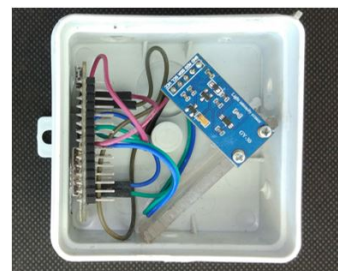
Este sensor é utilizado em conjunto com o módulo WiFi ESP8266 Nodemcu (Figura 5.1-b) responsável pela leitura da informação proveniente do sensor e posterior envio dos valores para o CDR, via MQTT.



(a) Sensor BH1750 GY-30



(b) Placa Nodemcu



(c) Módulo de Monitorização da Luminosidade

Figura 5.1: Componentes do sistema de leitura da luminância de uma determinada zona - Módulos M1 e M2 da Figura 4.1

A escolha do módulo Nodemcu deveu-se não só ao seu baixo custo de aquisição, como

também ao abrangente número de interfaces de comunicação que integra, à facilidade de programação e carregamento de código, às suas reduzidas dimensões e ao alargado suporte técnico existente.

Com o objetivo de reduzir os consumos deste módulo, a medição de luminância apenas é enviada para o CDR a cada dez minutos ou quando a diferença entre o último valor enviado e a medição atual seja superior a 100 Lux.

5.1.2 Controlo de Luminárias

Para cumprir o requisito de controlo por zonas utilizou-se o Sonoff 4Ch Pro (Figura 5.2). A par do baixo custo de aquisição deste equipamento, acrescentam ainda as vantagens de possuir um módulo WiFi ESP8285 que permite uma comunicação com o CDR, sem fios, e o controlo individual do tipo ON/OFF de quatro luminárias ou conjunto de luminárias (quatro relés, cada um com posições N.O. e N.C.).

O firmware original pode ser substituído por outro mais adequado às funções desejadas, pelo que se procedeu a essa substituição. Mais precisamente, o novo firmware instalado permite a comunicação MQTT com o equipamento.

Este equipamento pode também ser fixado em calha DIN, facto essencial para a sua integração num quadro elétrico, local onde tem de ser instalado obrigatoriamente.

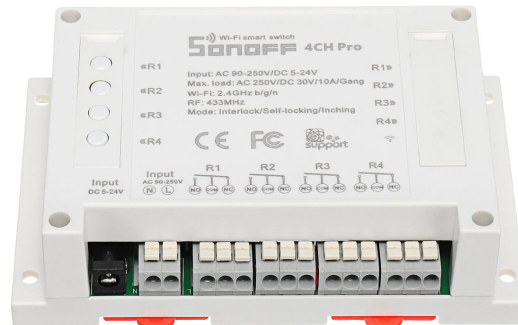


Figura 5.2: Sonoff 4 Ch Pro - Módulo M4 da Figura 4.1

5.1.3 Servidor (CDR)

Como servidor do sistema de controlo e monitorização a desenvolver, várias são as possibilidades existentes. Porém, a primeira escolha recaiu sobre um Raspberry Pi 3B (Figura 5.3) por ser um equipamento pouco dispendioso, existente em stock na empresa e por possuir especificações suficientes para cumprir os requisitos necessários.

Outras soluções poderão, no entanto, ser utilizadas, designadamente, módulos IOT 2020 ou 2040 da Siemens, ou ainda, qualquer computador fixo ou portátil.



Figura 5.3: Raspberry Pi Modelo 3B + - Módulo "Centro de Decisão e Registro" da Figura 4.1

5.1.4 Regulação do Fluxo Luminoso

Além do controlo ON/OFF, decidiu-se desenvolver um módulo de regulação do fluxo luminoso proveniente das luminárias. Para haver uma regulação autónoma e contínua, recorre-se à técnica de PWM, uma vez que as luminárias existentes possuem regulação de fluxo luminoso por 10V PWM.

Este módulo (Figura 5.4) é alimentado por 24V. O diagrama elétrico do PCB (Printed Circuit Board) realizada encontra-se no Apêndice D.

Para garantir que a regulação é feita de forma automática, controlada pelo CDR, e manual, caso o utilizador entenda necessário, existem duas saídas, uma por PWM, outra por um sinal DC derivado da alimentação e regulado por um potenciômetro.

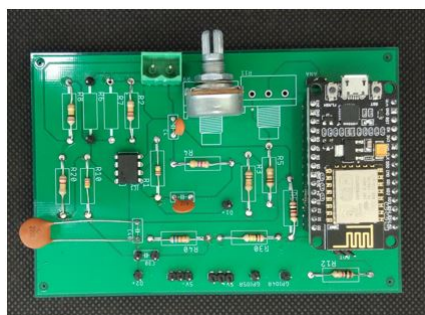


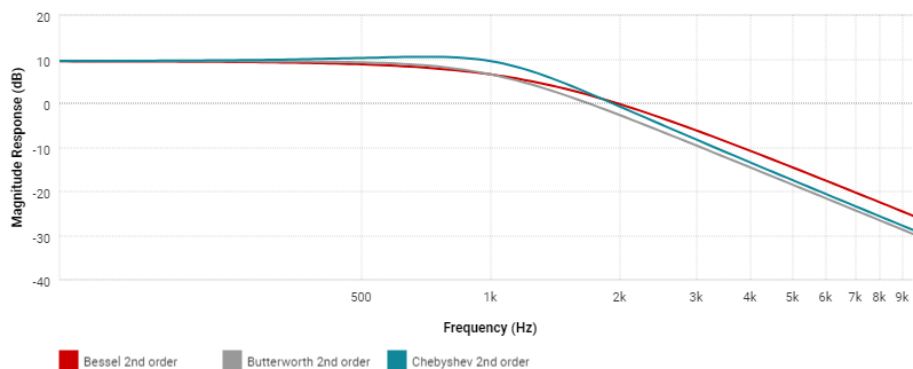
Figura 5.4: Módulo de regulação do fluxo luminoso

Quanto ao modo automático, recorreu-se a outra placa Nodemcu para gerar um sinal PWM (0V a 3.3V) com frequência de 500Hz. O valor da frequência encontra-se dentro

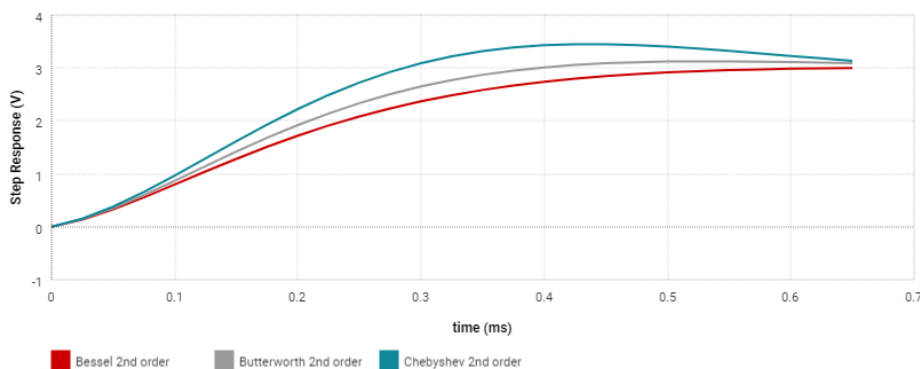
do intervalo exigido pelo fabricante da luminária (100Hz a 3kHz) conforme indicado no Apêndice H.

Para amplificar a tensão de saída do módulo Nodemcu de 0-3.3V para 0-10V recorreu-se ao amplificador operacional LM358 (com dois op-amps internos independentes). Para lidar com o ruído e obter um sinal o mais estável possível, projetou-se também um filtro ativo passa-baixo, recorrendo à ferramenta *Filter Pro* da *Texas Instrument*.

Nas especificações do filtro passa-baixo definiu-se um ganho de 3V/V (9.54dB) com frequência de corte de 1000Hz e de ordem 2. Quanto à resposta do filtro, de entre as opções mais comumente utilizadas em filtros ativos, designadamente, Chebyshev, Butterworth e Bessel que se encontram representadas nos gráficos das Figuras 5.5-a e 5.5-b, optou-se pelo tipo Butterworth. A escolha justifica-se por esta apresentar um desempenho intermédio em relação aos restantes tipos, já que, no domínio temporal (Figura 5.5-b) a estabilidade é atingida mais rapidamente que a resposta do tipo Chebyshev e no domínio da frequência (Figura 5.5-a) existe uma atenuação mais acentuada após a frequência de corte, em comparação com a resposta do tipo Bessel.



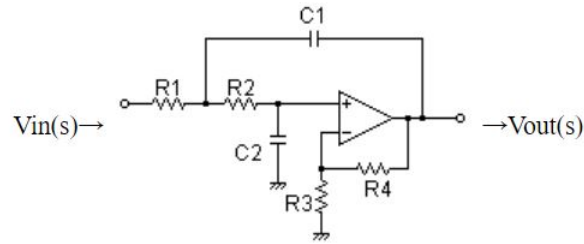
(a) Resposta na Magnitude



(b) Resposta no Tempo

Figura 5.5: Tipos de Resposta

Quanto à topologia do filtro, aplicou-se a Sallen-Key. O diagrama do circuito elétrico obtido, assim como a função de transferência do sistema encontra-se, abaixo, na Figura 5.6.



Transfer Function:

$$G(s) = \frac{118203309.69267}{s^2 + 8518.5185185185s + 39401103.23089}$$

R1 = 27kΩ
R2 = 20kΩ
R3 = 10kΩ
R4 = 20kΩ
C1 = 0.0047μF
C2 = 0.01μF

Figura 5.6: Diagrama do circuito elétrico do filtro Passa- Baixo

Quanto ao modo manual de regulação do fluxo luminoso, é realizado por meio de um potenciômetro, ligado a um divisor de tensão com saída de 12V (e posteriormente para 10V, através de um divisor resistivo) e entrada de 24V (alimentação do módulo).

A comutação entre o sinal 0-10VDC do modo automático e manual (a enviar ao driver da luminária) é realizada com recurso a um módulo com relé (Figura 5.11-a), controlado pela placa Nodemcu, em função de um botão físico de pressão sobre o qual o utilizador terá de atuar para haver a comutação. Caso o modo manual esteja ativo, com o pressionar do botão, o modo automático passa a atuar (após comutação do relé) e vice-versa. No entanto, tal operação pode igualmente ser realizada automaticamente pelo CDR para fazer o reset do modo de regulação (para o modo automático), todos os dias à meia-noite ou no final do horário laboral, por exemplo.

A deteção do botão pressionado é realizado através de um evento de interrupção associado a uma entrada digital da placa Nodemcu, conforme exemplificado na Figura 5.7. Quando o botão é pressionado a entrada D2 da placa fica no estado *HIGH*; quando se liberta o botão, D2 passa a assumir o estado *LOW*.

5.1.5 Monitorização Consumos Elétricos

A fim de se conhecerem os consumos energéticos associados à iluminação, retira-se partido de um equipamento compacto preparado para calha DIN, o SDM120 (Figura 5.8-a). Este medidor de energia mede uma única fase e fornece até doze parâmetros diferentes, de entre os quais se destacam a potência atual [W] e o consumo energético total [kWh].

A comunicação com este equipamento baseia-se no protocolo RS485, tendo sido utilizada uma placa Nodemcu (Figura 5.1-b) juntamente com um conversor MOD-RS485

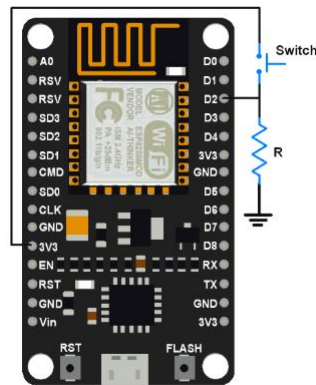
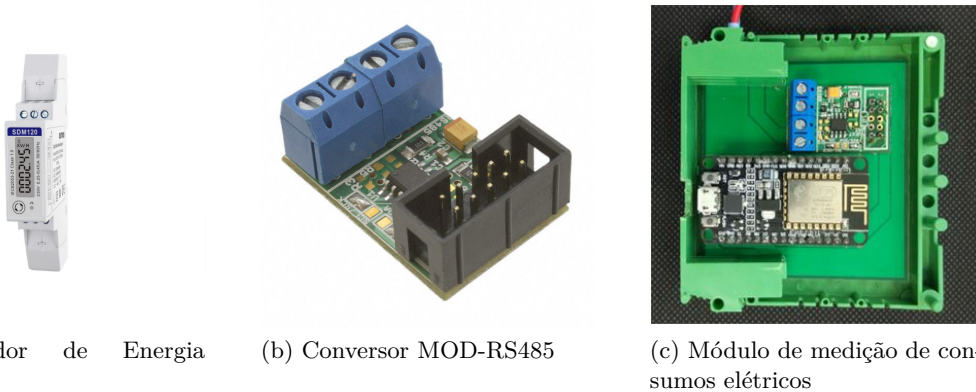


Figura 5.7: Exemplo das ligações à placa Nodemcu para detetar o evento de pressionar um botão



(a) Medidor de Energia SDM120

(b) Conversor MOD-RS485

(c) Módulo de medição de consumos elétricos

Figura 5.8: Componentes do sistema de leitura dos consumos energéticos de um grupo de luminárias - instalado junto ao Módulo M4 da Figura 4.1

(Figura 8-b) para ler os valores enviados pelo SDM120. Os dados lidos são então enviados para o CDR, via MQTT.

A placa Nodemcu e o conversor MOD-RS485 são encapsulados numa caixa preparada para calha DIN, a fim de serem instalados no quadro elétrico, junto dos vários módulos SDM120 e ligados em sequência (Figura 5.9) ao módulo de leitura, conforme representado na Figura 5.8-c.

O diagrama elétrico do PCB realizado para ser inserido na caixa (para calha DIN) encontra-se apresentado no Apêndice C.

5.1.6 Monitorização do Consumo de Ar Comprimido

Para ter acesso aos consumos de ar, utiliza-se um caudalímetro com contagem de pulsos (50ms cada) em função do consumo acumulado de ar comprimido.

Atendendo ao circuito interno do caudalímetro (Figura 5.10), desenvolveu-se o módulo (Figura 5.11-b) para a leitura de pulsos e conseqüente registo dos consumos. O diagrama elétrico do PCB realizado para este módulo encontra-se no Apêndice E.

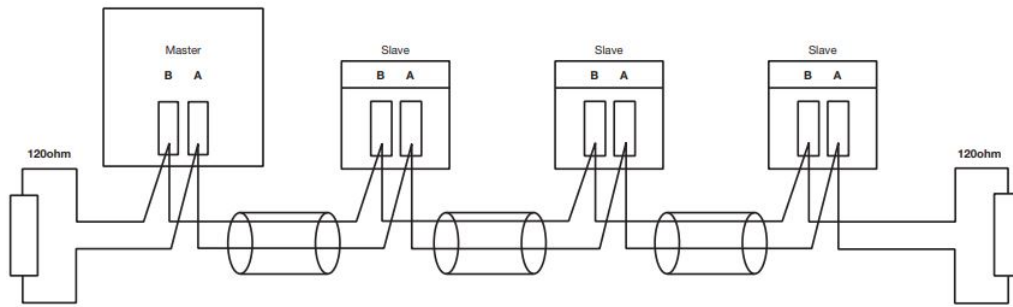


Figura 5.9: Topologia de ligação sequencial dos vários equipamentos medidores de energia

Novamente, retirou-se partido das capacidades da placa Nodemcu na leitura e envio da informação para o CDR.

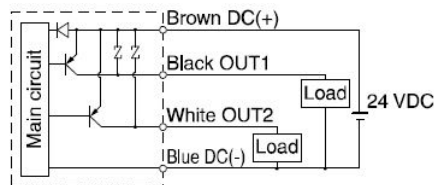
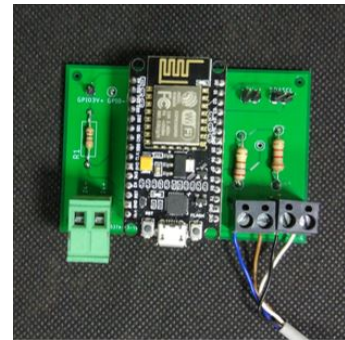


Figura 5.10: Circuito interno do caudalímetro do tipo PNP

A partir dos valores totais dos consumos é possível apresentar o perfil do consumos semanais, mensais e anuais ao longo do tempo.



(a) Placa de Relés com Sinal 5V e 2 Canais 220V/10A



(b) Módulo de Monitorização de Consumos de Ar Comprimido

Figura 5.11: Componentes do sistema de monitorização e controlado ar comprimido - Módulo M3 da Figura 4.1

O módulo desenvolvido está também preparado para incorporar um sensor de luminosidade, evitando a necessidade de instalação de um módulo extra (Figura 5.1-c) nas instalações para efeitos de caracterização das condições luminosas no ambiente. Está ainda preparado para o controlo de uma eletroválvula que pode ser acionada remotamente, em conjunto com uma placa de relés (Figura 5.11-a).

5.1.7 Esquemas Elétricos

Parte dos esquemas elétricos da instalação do sistema de controlo da iluminação (sonoff), realizados em EPLAN, podem ser consultados no Apêndice F.

5.2 Centro de Decisão e Registo - CDR

O Centro de Decisão e Registo é o principal componente de todo o sistema desenvolvido, na medida em que toda a informação passa por este módulo e é a partir desta que se tomam as decisões de atuação, e ainda onde se encontra a base de dados na qual se registam os dados do sistema. De seguida, aborda-se, de forma detalhada, o modo de funcionamento do CDR.

5.2.1 Node-Red

O Node-Red é a plataforma sob a qual a solução de controlo e monitorização é desenvolvida. Este é lançado automaticamente quando o CDR (neste caso, o Raspberry Pi) é ligado, permanecendo ativo (em *background*) sem que seja necessário algum tipo de comando manual de um utilizador. O mesmo acontece com o broker Mosquitto. Desta forma, caso se registre um *shutdown* inesperado do CDR, basta voltar a ligá-lo e o sistema de controlo e monitorização recomeça a funcionar automaticamente.

Por outro lado, em situações em que a ligação à Internet cesse, o sistema pode continuar a funcionar normalmente, dentro da empresa. Apenas o acesso exterior, via VPN, é interrompido.

Conforme constatado na revisão do Estado da Arte, o Node-Red é uma plataforma bastante poderosa a nível de recursos e interfaces de comunicação que permite a rápida integração de módulos adicionais ao sistema. Tem incorporada uma interface web, essencial para a monitorização e controlos remotos pretendidos, sendo aberta e gratuita, o que reduz consideravelmente os custos da solução final.

Ademais, a programação nesta plataforma é bastante expedita, assim como o *debug* de falhas que possam ocorrer.

A interface de controlo remota criada no Node-Red encontra-se acessível a todos os utilizadores. No entanto, a interface de programação é protegida com nome de utilizador universal e palavra-pass, por questões de segurança (Figura 5.12).

5.2.2 Algoritmo de Controlo da Iluminação

O fluxograma do algoritmo respeitante ao controlo da iluminação encontra-se no Apêndice A.

O algoritmo de controlo começa por verificar se os modos de controlo manual, quer local quer remoto, estão ativos. Caso tal seja verdadeiro o sistema fica a aguardar pela introdução das instruções do utilizador, sendo ignorados os fatores luminosidade ou o horário de trabalho. Pelo contrário, se ambos os modos de controlo manual estiverem desativos o sistema corre o algoritmo periodicamente (de forma automática e autónoma).

Valores de luminosidade inferiores ao *threshold thr_ON* levam à imediata ativação das luminárias. Outra ação imediata sobre a iluminação resulta da verificação do horário de funcionamento do sistema. Se este estiver desativo ou se a hora atual do dia se encontrar fora do intervalo definido pelo horário, o sistema desligará a iluminação.

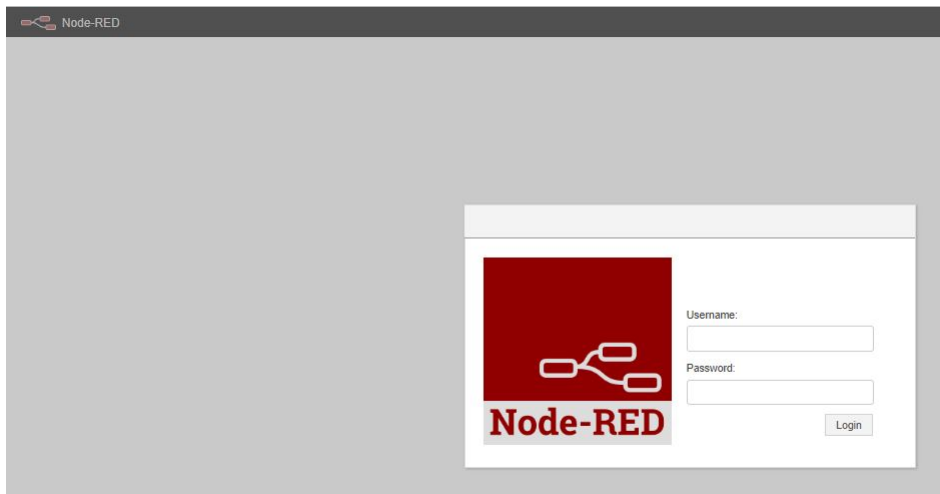


Figura 5.12: Interface de Login para aceder ao ambiente de programação do Node-Red

Quando os valores de luminosidade superarem o *threshold thr_ON* o sistema alterna o controlo entre os grupos (neste exemplo dois, podendo, contudo, ser superior) de luminárias da zona a controlar. A título de exemplo, estes grupos de luminárias encontram-se numerados de 1 a 3 na Figura 4.1, quer para a "Zona1" quer também noutra "Zona2". Esta alternância ocorre entre períodos de X minutos, definidos pelo utilizador, permitindo a fragmentação da iluminação por zonas, o que contribui para uma maior eficiência energética. Assim, a cada X minutos é verificado, para um determinado grupo, se o respetivo modo de hibernação está ativo. Se este modo estiver desativo o sistema continua para a próxima verificação, onde é averiguado se a luminosidade satisfaz a condição definida pelo *threshold thr_OFF*. Com efeito, se os valores de luminosidade forem superiores a este *threshold*, a iluminação do grupo será desligada. Se for inferior, é então verificado se a luminosidade exterior é superior ao valor estabelecido pelo *threshold thr_EXT*. Após este ponto, o algoritmo repete-se, agora, para outro grupo da mesma zona.

O sensor responsável pelas medições exteriores não se encontra sob a influência da iluminação interior, pelo que, fornece uma ideia aproximada do período do dia e respetivos níveis de luminosidade natural. Esta informação é crucial quando a luminosidade interior se encontra entre *thr_ON* e *thr_OFF*, sobretudo por permitir desligar as luminárias apenas quando a luminosidade natural é suficiente para satisfazer as necessidades.

5.2.3 Modo de Hibernação

A fim de atenuar os efeitos da flutuação da luz natural (num dia nublado com algumas abertas, por exemplo) que influenciam a necessidade de luz artificial, criou-se o modo de hibernação. Cada grupo de luminárias tem um modo de hibernação, o que significa que cada grupo é monitorizado individualmente. Mais concretamente, caso um grupo esteja ligado, se este desligar e voltar a ligar logo de seguida, num intervalo de tempo inferior a X ms (começado a contar a partir do momento em que se desligou), então este grupo entrará em modo de hibernação. Neste modo, as luminárias do grupo em questão permanecem ligadas ininterruptamente durante um longo período de tempo, fixado previamente, independentemente das condições luminosas que se registem. Apenas os

comandos manuais ou as condições do horário laboral poderão desligar as luminárias durante esse período. Inserido nos comandos manuais, existe, todavia, a possibilidade de desativar os modos de hibernação caso o utilizador pretenda.

O algoritmo aplicado neste modo encontra-se explicitado no fluxograma da Figura do Apêndice B. O intervalo de tempo referido anteriormente (entre desligar e ligar logo de seguida) é medido em milisegundos. O valor de X não é regulável na interface remota, sendo igual a 120000ms, neste momento. A título de exemplo, o grupo de luminárias "1" da "Zona1" é designado, no fluxograma, como o conjunto "Z1.1".

5.2.4 Interface Gráfica

A interface do sistema de controlo e monitorização é criada também no Node-Red e acedida no browser, à semelhança do ambiente de desenvolvimento da aplicação, mas num endereço (janela do browser) diferente.

Abaixo, apresentam-se as principais características, incluindo os diferentes tipos de controlos e monitorizações, oferecidas pela interface cuja visão global se encontra no Apêndice G.

- **Controlo da Iluminação**

Uma das operações mais básicas exigidas da interface remota é a possibilidade de controlo remoto da iluminação. Na Figura 5.13 apresenta-se os comandos associados a uma zona específica do chão de fábrica.

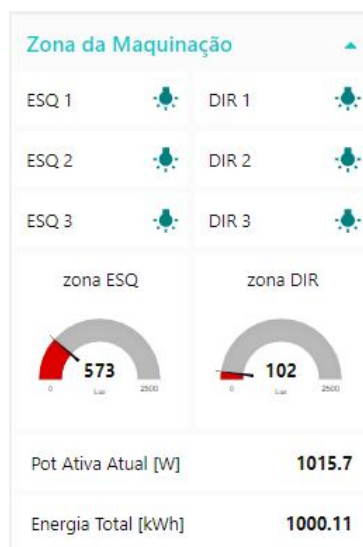


Figura 5.13: Controlo da iluminação da zona de maquinação

Para cada zona existe uma interface semelhante, com a informação da luminosidade sentida no espaço em causa, bem como com os consumos energéticos da iluminação desta zona. A indicação do estado das luminárias é dada pela cor do ícone "lâmpada": verde - ligado; vermelho - desligado.

Para controlar manualmente a iluminação, após ativar o comando manual remoto (como descrito à frente), basta clicar sobre a luminária que se pretende para alterar o estado de ON para OFF e vice-versa.

- **Horários**

Um dos mais importantes inputs do sistema por parte do utilizador é a introdução dos horários laborais. A definição dos horários de funcionamento contribuem para a diminuição de desperdícios energéticos associados à iluminação, uma vez que, muitas vezes, se identificam situações de luminárias ligadas em espaços desocupados, para lá do horário de trabalho.

Por este motivo, atribui-se grande importância a este aspeto, sendo possível definir três tipos de horários. Concretamente, existe o horário semanal (de segunda-feira a sexta-feira), o horário de fim de semana (sábado e domingo, definidos separadamente) e ainda horário para eventos extraordinários (dias e eventos que não se enquadram em nenhum dos horários anteriores).

No horário semanal, o utilizador define a hora de início e a hora do fim do dia de trabalho. Analogamente, as mesmas definições são realizadas quer para os dias de sábado quer para os domingos. Mais ainda, por existirem zonas da fábrica com horários diferentes das restantes, existem também horários diferentes para as respetivas zonas. Na Figura 5.14, encontra-se a interface de programação de horário, para grande parte do chão de fábrica, designado Horário Geral. Para outras zonas, a definição do horário é semelhante.

Horário Geral	
Ativar Horário Semanal	
Semana - início	7
Semana - fim	18
Ativar Horário Sabado	
Sabado - início	9
Sabado - fim	13
Ativar Horário Domingo	
Domingo - início	9
Domingo - fim	13

Figura 5.14: Definição do horário geral de semana e fim de semana

Quanto ao horário extraordinário, este é programado para dias ou eventos extraordinários. O utilizador deve introduzir os dias de início e fim durante o(s) qual(is) o evento decorrerá, bem como as horas de início e fim. Terá ainda de ser introduzido que tipo de ação se deverá realizar, isto é, se durante o evento extraordinário o sistema deverá atuar normalmente com o modo automático (ação = AUTO) ou se, pelo contrário, deverá desligar a iluminação (ação = OFF). Por exemplo, se for necessário realizar operações de manutenção noturnas, durante uma ou mais noites na empresa, poderá ser criado um horário extraordinário para essas datas de forma rápida e com bastante antecedência. Outro exemplo para a aplicação deste tipo

de horário são os feriados em que, caso não haja ninguém na empresa nesses dias específicos, o sistema poderá ser programado para desligar a iluminação, através do horário, também com bastante antecedência. Durante o processo de registo destes eventos extraordinários, poderão ser associadas descrições breves acerca do evento. Os cinco eventos extraordinários mais próximos de ocorrer podem ser consultados no separador próprio (numa tabela) da interface do sistema.

Figura 5.15: Definição do horário para eventos extraordinários

Proximos 5 eventos							
Search							
DataInicio	DataFim	HorInicio	HoraFim	Descricao	Acao	Estado	ID
1/12/2020	1/12/2020	12	18	Feriado	off	agendado	1
8/12/2020	8/12/2020	12	18	Feriado	off	agendado	2

Apagar evento com 'ID': _____ **APAGAR**

Figura 5.16: Tabela com registo de eventos extraordinários

Por último, importa referir que o horário extraordinário tem prioridade sobre os restantes horários semanais ou de fim de semana.

Para reduzir qualquer inconveniência que a iluminação possa causar aos utilizadores, é também possível definir compensações (*offsets*) das horas inicial e final do dia de trabalho, isto é, pode-se definir que a iluminação se ligue mais cedo (e quanto), antecedendo a chegada dos utilizadores, e que se desligue mais tarde, no fim do dia, alongando a margem de tempo que os mesmos têm para sair.

Como visto anteriormente, o horário funciona como critério incontornável para a iluminação ser ligada caso se verifiquem tais necessidades. Ademais da definição dos horários, é também possível ativá-los e desativá-los (botão ON/OFF) na interface (Figura 5.14). Se um horário estiver desativo, por exemplo, o horário

de domingo, então o sistema ignorará as horas de início e fim associados, permanecendo inativo durante esse dia. Esta implementação permite assim, desativar rapidamente a iluminação de uma zona, desativando simplesmente o seu horário.

- **Thresholds**

Outro parâmetro fundamental para o correto funcionamento do sistema é a definição dos níveis de luminosidade a partir dos quais a iluminação é ligada ou desligada, conforme abordado anteriormente.

O seu papel é fundamental para a correta calibração do sistema de iluminação na fase inicial, após instalação.

É possível regular os três *thresholds*, tal como explicitado na Figura 5.17.



Figura 5.17: Configuração dos *Thresholds*

O *threshold* *Nível – ON* indica o valor de luminância a partir do qual a iluminação liga de imediato, caso o valor lido pelo módulo da Figura 5.1 seja inferior a esse nível. Por sua vez, luminâncias superiores ao valor definido por *Nível – OFF*, levam o sistema a desligar a iluminação. O *threshold* *Nível – LuzExterior* corresponde ao *thr_EXT* do fluxograma do controlo da iluminação (Apêndice A) e fornece uma indicação da quantidade de luz natural que chega ao módulo da medição da luminosidade, no interior da empresa.

- **Comandos Manuais**

Quanto aos comandos manuais, estes podem ser introduzidos a dois níveis. O utilizador pode controlar a iluminação no quadro elétrico (Figura 5.18), no chão de fábrica, ou através da interface gráfica remota. Estes dois níveis de controlo e ainda o modo automático atuam em exclusividade, já que, quando um é ligado os restantes ficam inativos. Quando se desligam os modos manuais, o automático atua por defeito.

Os modos manuais têm prioridade sobre o modo automático. Por esse motivo, o sistema desativa todos os modos manuais uma hora depois do final do horário de trabalho para evitar os casos em que os utilizadores se esquecem inadvertidamente do modo manual ligado e, por conseguinte, a iluminação. No entanto, se após o sistema desativar os modos manuais, um utilizador volta a ativa-los (já em período de trabalho extraordinário), a sua desativação fica sob responsabilidade exclusiva desse utilizador.

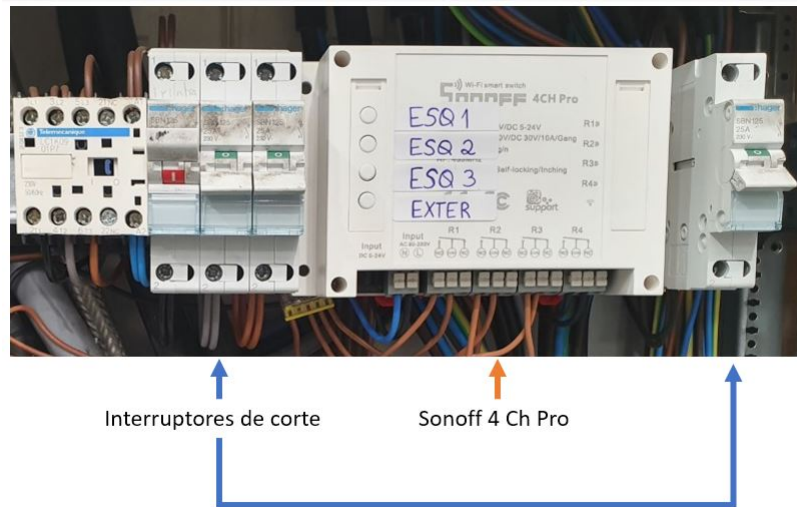


Figura 5.18: Controlo manual da iluminação no quadro elétrico: Ligar/Desligar as luminárias através dos botões do sonoff com sistema redundante (ligado em paralelo) constituído por interruptores de corte para precaver alguma falha do sonoff

Na interface remota, existem um controlo (ON/OFF) para ativar o modo manual remoto e uma indicação (ON/OFF) do controlo manual local (ativado apenas no quadro elétrico), como indica a Figura 5.19.



Figura 5.19: Ativação e desativação dos Controlos Manuais

5.2.5 Gestão de Alertas

Uma importante característica partilhada pelos sistemas de gestão mais avançados e completos que o Node-Red também permite implementar é o envio de alertas, via email, para qualquer endereço que o gestor do sistema pretenda.

Além do envio de mensagens por correio eletrónico, é também possível incorporar outras ações locais, como sinais luminosos indicativos de alguma falha ou necessidade de intervenção no sistema. Porém, atualmente, apenas a gestão de alertas por email está ativa, uma vez que, localmente, a identificação de falhas e o processos de *debug* do sistema são bastante simples e expeditos, na interface de programação do Node-Red.

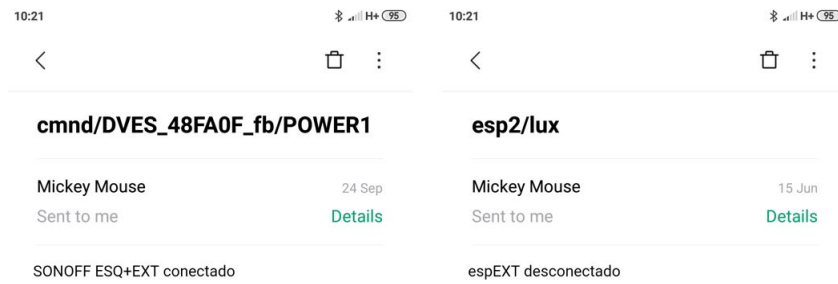


Figura 5.20: Exemplos de alertas via email de dois módulos diferentes

5.2.6 Monitorização do Ar Comprimido

No que diz respeito à rede de ar comprimido, apenas a sua monitorização está integrada na interface remota. Aqui, é possível visualizar os perfis de consumos semanais, mensais e anuais, na secção específica da interface, através dos respetivos gráficos. Um exemplo semelhante a estes gráficos é apresentado no exemplo da Figura 5.21.

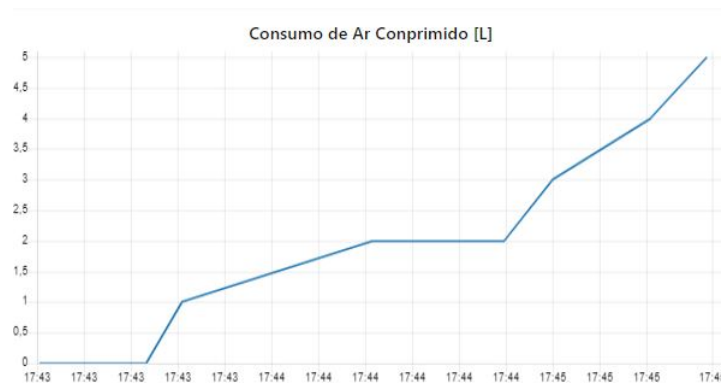


Figura 5.21: Exemplos do perfil de consumo de ar comprimido (total) realizado na fase de teste

O gráfico acima foi obtido durante a fase de desenvolvimento e testes da aplicação de monitorização do consumo de ar, tendo sido utilizado um caudalímetro da SMC (Figura 5.22).

Como apenas se tem acesso à medição do consumo de ar total, ao longo do tempo (por contagem de pulsos), a obtenção dos consumos parciais (por semana, mês e ano) é realizada através de operações de subtração dos últimos valores registados ao valor total atual. Mais precisamente, a cada mudança de semana por exemplo, é registado o valor (consumo de ar) acumulado até então. A este valor subtrai-se a soma dos consumos parciais de todas as semanas anteriores, obtendo-se o consumo parcial da semana que acabou de passar. Os valores mensais e anuais de consumos são calculados de forma análoga, conforme ilustração na Figura 5.23.



Figura 5.22: Modelo PFM725S-01-L-B da SMC

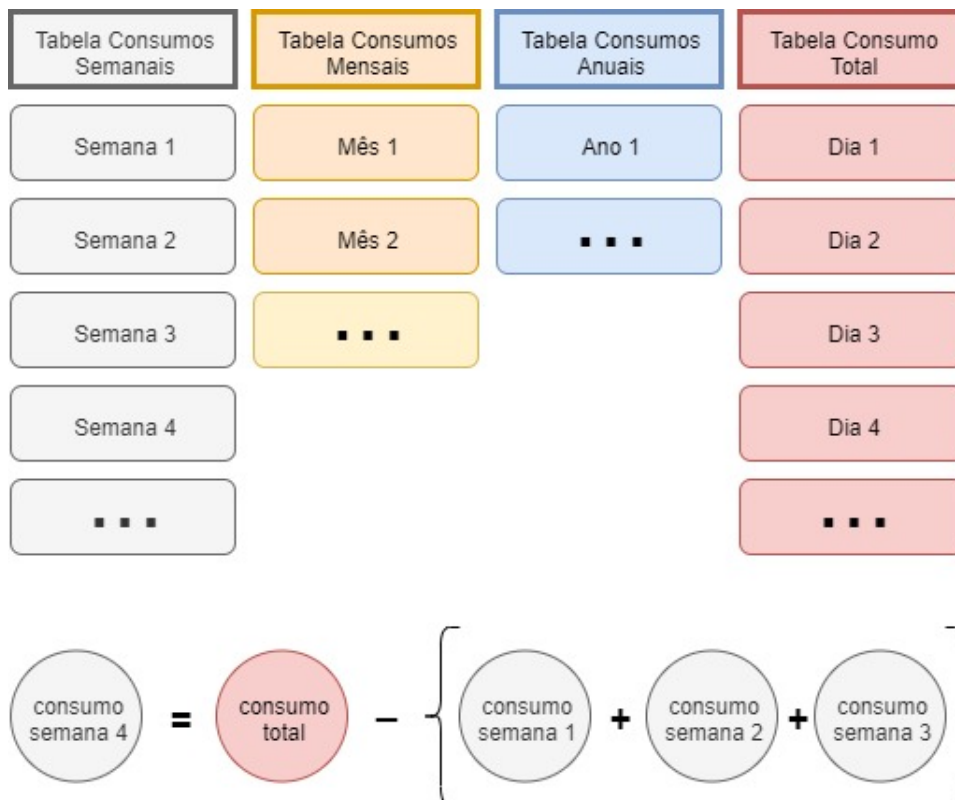


Figura 5.23: Cálculo e registo dos consumos semanais de ar comprimido

5.2.7 Base de Dados

A par do controlo e monitorização, o registo do estado e das variáveis do sistema desenvolvido é uma ação fundamental a ter em conta. A base de dados (mariaDB) encontra-se também instalada no CDR.

Caso seja necessário, é possível verificar o histórico do sistema através da consulta e exportação das inúmeras tabelas existentes na base de dados.

A estrutura da base de dados e as tabelas criadas vão de encontro às características

particulares do sistema desenvolvido, como a existência de diferentes zonas a controlar e monitorizar, a existência de parâmetros comuns a todas as zonas, o tipo de dados recolhidos, entre outras. A apresentação da estrutura da base de dados é discutida separadamente para a iluminação e ar comprimido, de seguida.

Considere-se que todas as tabelas da base de dados possuem as colunas com 'id' e 'Data' referentes ao registo efetuado, pelo que (estas duas colunas) serão omitidas nas tabelas seguintes, sendo representadas apenas as colunas específicas de cada tabela.

5.2.7.1 Iluminação

Dada a modularidade característica do sistema, optou-se por criar uma tabela por cada zona a controlar com as respetivas variáveis associadas. Assim, cada zona do chão de fábrica ('Zona1', 'Zona2', etc) tem uma tabela associada, à semelhança da seguinte:

Tabela 5.1: Exemplo da tabela associada a uma determinada zona

Lux	EstadoConjN	Man_Remoto	Man_Loc	Mod_HiberConjN	Pot	TotEner
400	ON	0	0	0	15	20

Os registos nesta tabela são realizados a cada dez minutos.

A designação "*ConjN*" refere-se aos *N* (número inteiro ≥ 1) grupos de luminárias que podem existir numa zona. Apesar de tal não ser representado no exemplo da tabela acima, o estado de cada um dos grupos é registado (isto é, na tabela são especificados os "*Estado_Conj_1*", "*Estado_Conj_2*", ..., "*Estado_Conj_n*").

O estado dos comandos manuais remotos e locais ("*Man_Remoto*" e "*Man_Loc*", respetivamente), mesmo sendo transversal a todo o sistema, é registado em todas as tabelas das diferentes zonas.

Esta decisão, assim como outras, foram tomadas com vista a permitir a visualização o mais detalhada possível do comportamento de cada zona isoladamente das restantes, respeitando a modularidade do sistema implementado. Por este motivo também, optou-se por registar os consumos de energia elétrica ("*Pot*"(W) - potência instantânea - e "*TotEner*"(kWh) - total energia acumulado) por cada zona.

Os diferentes níveis reguláveis de luminosidade do sistema (*thresholds*) são registados na seguinte tabela.

Tabela 5.2: Tabela com o registo dos diferentes *thresholds*

thr_ON	thr_OFF	thr_EXT
950	1500	3000

A fim de garantir que não se perdem os valores da calibração do sistema, todos os dias à meia-noite são acrescentados a esta tabela os últimos valores dos diferentes *thresholds* introduzidos pelo utilizador no sistema. Em caso de encerramento inesperado do CDR, os valores da última linha da Tabela 5.2 são resgatados.

Quanto ao horário, existem diferentes tabelas para cada zona. Nestas tabelas registam-se as horas de atividade, de início e fim para a semana, sábado e domingo, conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Exemplo da tabela com o horário associado a uma determinada zona

H_sem_i	H_sem_f	H_sab_i	H_sab_f	H_dom_i	H_dom_f
9	18	9	13	9	12

Dada a natureza deste tipo de parâmetros (horas de funcionamento), estas tabelas com os horários normais, são apenas atualizadas a cada mudança efetuada, pelo que, possuem apenas uma linha.

Por outro lado, os horários dos eventos extraordinários são registados um por um, havendo um histórico dos eventos passados (terminados), presentes (a decorrer) e futuros (agendados). A tabela referente a este horário é apresentada abaixo.

Tabela 5.4: Exemplo da tabela com o horário de eventos extraordinários

Dia_i	Dia_f	H_i	H_f	Mes_i	Mes_f	Ano_i	Ano_f	Descricao	Estado
1	1	9	18	12	12	2020	2020	Feriado	Agendado

A data com dia da semana, mês e ano é introduzida pelo utilizador através de um formulário de seleção de datas. A escolha das horas de início e de fim do evento é realizada à semelhança dos outros horários.

Na introdução das datas dos eventos extraordinários é tido em conta se a data final é posterior à data inicial, de modo a evitar erros e conflitos futuros no sistema de controlo. A submissão do evento só é possível se este horário estiver ativo, evitando assim submissões acidentais.

A tabela com os registos destes eventos existente na interface gráfica atualiza a introdução (ou eliminação) de novos registos de minuto a minuto.

5.2.7.2 Ar Comprimido

Quanto ao registo da informação proveniente da rede de ar comprimido, trata-se de uma operação simples dado o baixo volume de informação. Não obstante, para facilitar a apresentação dos dados, designadamente, os perfis de consumos de ar comprimido semanais, mensais e anuais, decidiu-se criar uma tabela por cada período e ainda outra com o histórico do total absoluto (ver Figura 5.23).

O consumo total acumulado é registado diariamente.

Dada a simplicidade destas tabelas, que possuem apenas os valores de consumos (em metros cúbicos), para além do id e da data dos registos, dispensa-se representação.

5.3 Monitorização de Presença Humana

As diferentes características dos espaços, bem como o perfil de utilização das zonas de escritórios e salas dentro da empresa, motiva a procura de um método adequado para a deteção de presença humana, essencial, por um lado, para melhorar a eficiência energética nas zonas citadas, e por outro, garantir uma boa experiência dos utilizadores relativamente à iluminação ou outros sistemas.

Com efeito, implementaram-se duas metodologias distintas de deteção. Abaixo, discutidas seguidamente.

5.3.1 Monitorização de Presença por Contagem de Pessoas

Um sistema ideal que contribuiria para uma gestão otimizada de recursos energéticos num edifício de serviços com zonas de escritórios e salas, seria um sistema de deteção humana que permitisse saber o número exato de pessoas num dado espaço a um dado momento. Tal deteção permitiria a regulação eficiente de equipamentos de iluminação, ar condicionado e outros, às necessidades reais dos utilizadores dos espaços.

Seguindo esse pressuposto, desenvolveu-se uma aplicação para contabilizar o número de pessoas que entra e sai de uma sala, permitindo conhecer a cada instante o número de ocupantes. Para o efeito, utilizaram-se dois sensores infravermelhos de deteção de objetos, um no interior da sala e outro no exterior, ambos junto à porta de entrada.

O hardware utilizado encontra-se na Figura 5.24.

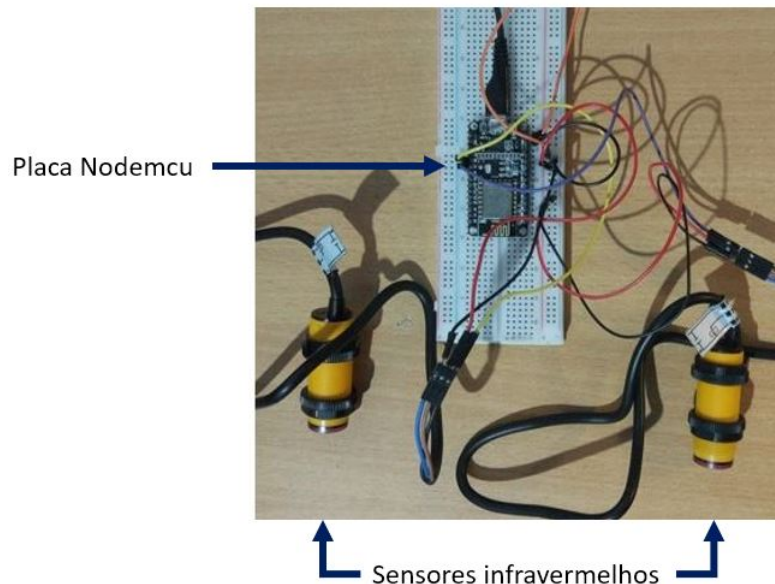


Figura 5.24: Aplicação para contagem de pessoas com dois sensores de infravermelhos E18-D80NK e uma placa Nodemcu com o módulo WiFi ESP8666

Os sensores utilizados possuem um emissor infravermelho e um par recetor. Quando um objeto se encontra à frente do sensor, a luz infravermelha emitida reflete no objeto e é captada pelo recetor. A presença ou ausência de deteção é transmitida à placa Nodemcu, através de uma saída lógica dos sensores E18-D80NK.

O tipo de movimento, isto é, entrada ou saída da sala, é distinguido com base na sequência de obstrução dos sensores. De forma genérica, se o sensor exterior for obstruído primeiro que o sensor interior, o sistema deteta a entrada no espaço de uma pessoa. Caso se verifique o inverso, tal é contabilizado como uma saída. A sequência concreta de obstruções de cada sensor que é detetada pela placa Nodemcu para incrementar uma saída, é apresentada na Figura 5.25: a seta vertical indica o sentido e direção de deslocação do utilizador em relação aos sensores; a seta horizontal indica os diferentes estados de ambos os sensores à medida que o utilizador se aproxima, passa por e se afasta da porta. A linha superior corresponde ao "Sensor Interior" enquanto que a linha inferior corresponde ao "Sensor Exterior".

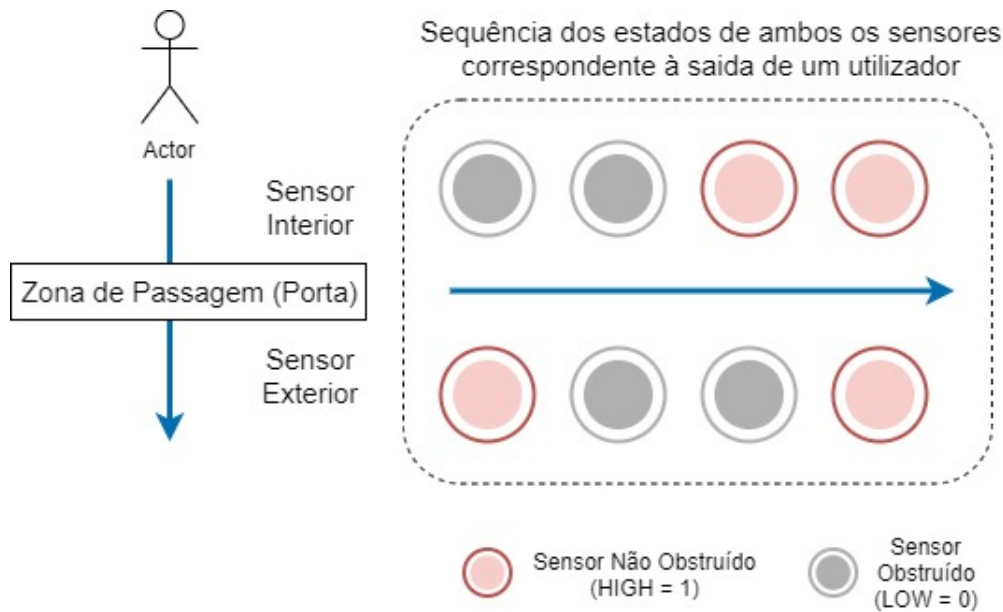


Figura 5.25: Sequência dos sinais lógicos enviados pelos sensores infravermelhos para a placa Nodemcu à medida que o utilizador sai da sala

A deteção da entrada é realizada de forma análoga, com as sequências invertidas.

A distância de deteção dos sensores infravermelhos é regulável de 3 a 80 centímetros.

A cada entrada ou saída, a placa Nodemcu incrementa ou subtrai um utilizador em função do movimento detetado e envia o número total de pessoas contabilizado, via MQTT, para o CDR. Neste equipamento, um ficheiro csv é atualizado com a hora e a data e o número de presenças no interior da sala.

5.3.2 Deteção de Presença com Algoritmos de *Machine Learning*

Seguindo a tendência atual na área de investigação da deteção de presença humana, com base no tratamento de informação com algoritmos de machine learning, decidiu-se implementar outra aplicação a partir destes métodos, de acordo com a revisão do Estado da Arte. O objetivo passa por adquirir dados que se relacionem diretamente com a atividade humana dentro da empresa, e a partir destes, classificar se existe ou não pessoas nos espaços em causa.

Uma vantagem desta abordagem reside no aproveitamento de dados que se pretendem medir e registar noutros âmbitos. Por exemplo, uma fonte de informação utilizada na aplicação implementada é o consumo de energia elétrica associado à zona em estudo. A monitorização e registo dos consumos energéticos é em si mesmo desejável, independentemente do desenvolvimento da aplicação para deteção humana.

Outra fonte de dados também utilizada é a monitorização de dispositivos com WiFi ligado, como telemóveis e computadores portáteis.

Assim, instalou-se um módulo (Figura 5.26) constituído por um medidor SDM120, um conversor MOD-RS485 e uma placa Nodemcu, para medir a potência instantânea (W) e a corrente (A) de uma tomada onde são ligados equipamentos, geralmente, sempre que os utilizadores se encontrem na sala. Ao longo de 10 minutos realizam-se 15 medições.

Após este intervalo, são calculadas as respectivas médias e enviadas, via MQTT, para o CDR. De salientar que existem equipamentos permanentemente ligados, servido como referência dos períodos de ausência de pessoas no espaço.

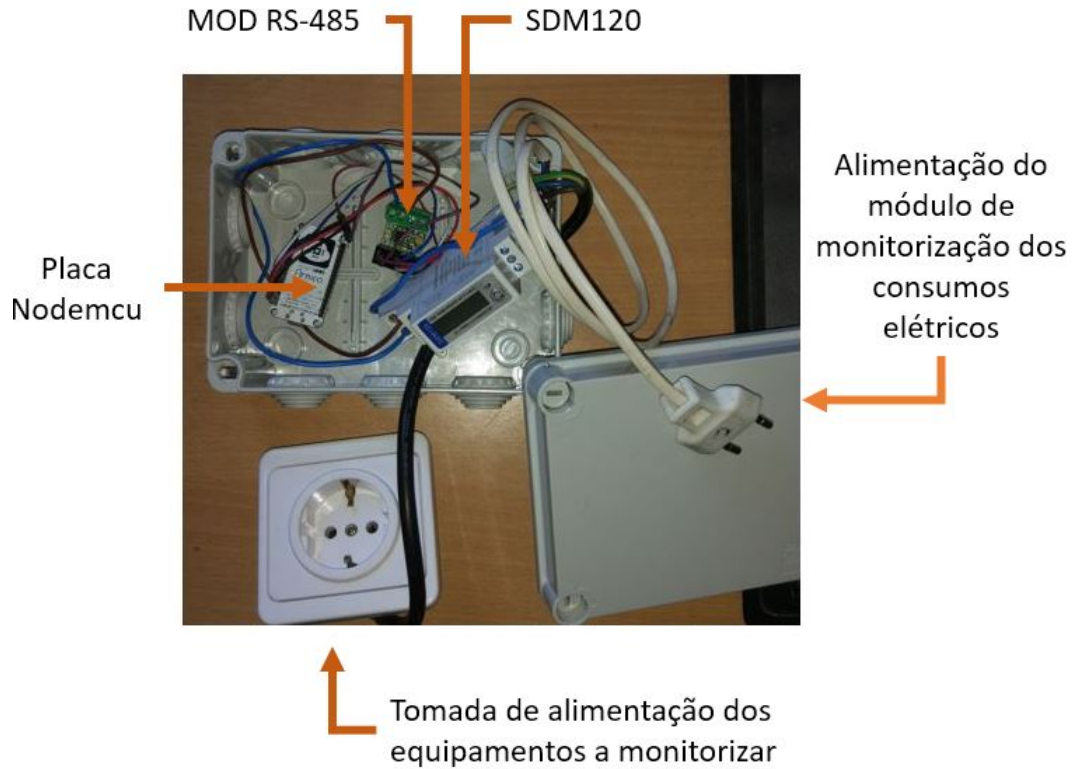


Figura 5.26: Aplicação para o registo da potência e corrente elétrica de uma tomada com um contador SDM120 e uma placa Nodemcu com o módulo WiFi ESP8666

Paralelamente a estes registos, uma outra placa Nodemcu foi instalada na sala em questão para detetar o sinal emitido pelos dispositivos com WiFi ligado. Os endereços MAC de cada dispositivo detetado são guardados numa *array*. O comprimento desta *array* é então enviado para o CDR, via MQTT, como indicação do número de dispositivos detetados na área. Cinco minutos após um dispositivo ser detetado e registado, o seu endereço é eliminado da *array* referida. Se o dispositivo ainda se encontrar no espaço, é detetado e registado novamente. Caso contrário, esse dispositivo é considerado como fora da área de estudo, isto é, inexistente. Apenas são registados equipamentos cujo RSSI (indicador de intensidade do sinal recebido) seja superior a -65 (número inteiro negativo).

Com os três dados adquiridos, designadamente, a potência, a corrente elétrica e o número de dispositivos com WiFi ligado, o CDR cria e atualiza um ficheiro csv com a hora e data do registo. Adicionalmente, regista-se também o estado do utilizador (*entrou* - 1, *saiu* - 0) que é atualizado manualmente quando este entra ou sai do espaço. Esta última coluna de dados (zeros e uns) serve de classificação binária (presença ou ausência) para cada linha com os três parâmetros anteriores registados.

Para classificar a presença humana perante a informação recolhida, recorre-se aos algoritmos de *machine learning*, SVM (*Support Vector Machine*) com *kernel* do tipo

linear e DT (Decision Trees), implementados em Python. O ficheiro csv anterior é utilizado na parametrização dos classificadores, bem como na avaliação dos respetivos desempenhos, nomeadamente, 75% dos 891 registos obtidos são utilizados para treino dos algoritmos. Os restantes 25% são empregues na avaliação das classificações obtidas.

A opção da implementação em Python, baseado nas bibliotecas desenvolvidas por [38], justifica-se pela vasta documentação oferecida que proporcionam uma aplicação expedita dos algoritmos.

- Implementação do SVM

Os principais passos para a implementação do algoritmo de classificação passam primeiramente pela separação da informação em características (X) e respetivos "rótulos"(y),

```
X = bankdata.drop('Class', axis=1),
y = bankdata['Class'],
```

e pela divisão dos dados para treino (X_{train} , y_{train}) e para testes (X_{test} , y_{test}), conforme referido anteriormente. Esta divisão é essencial para garantir que a avaliação do algoritmo é realizada com dados que este nunca tratou.

```
X_train, X_test, y_train, y_test =
train_test_split(X, y, test_size = 0.25).
```

O método de *kernel* utilizado foi o linear, uma vez que, métodos não lineares são computacionalmente mais pesados e não apresentaram melhorias do resultado final em comparação ao método linear. Quanto à suavização das margens, utilizou-se o parâmetro C (Figura 3.25) igual a 1.

```
from sklearn.svm import SVC
svclassifier = SVC(kernel='linear', C=1.0)
svclassifier.fit(X_train, y_train)
```

- Implementação do DT

A preparação dos dados é comum para ambos os algoritmos até à separação destes em grupos de treino e de teste. Após esta fase implementa-se o classificador do algoritmo DT.

```
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
classifier = DecisionTreeClassifier()
classifier.fit(X_train, y_train)
```

Para a classificação de presença em tempo real, criou-se também um servidor, através de uma *Framework Web* em Python de alto nível, o Django.

O CDR (cliente) envia um pedido GET com a informação dos três parâmetros recolhidos para o servidor, via http. No servidor, os dados são formatados e servem de input aos classificadores de *machine learning* cujo *output* é retornado ao CDR. Com a informação recebida, o CDR fica responsável pela tomada de decisão no controlo dos recursos energéticos do espaço, nomeadamente, ligar a iluminação caso haja utilizadores presentes, ou o seu contrário caso a sala se encontre livre de ocupação.

A implementação do pedido http é representada na Figura 5.27. O *node* azul possui a *payload* com a rotina que deve ser chamada dentro do servidor (*classificaSVM*) e os parâmetros de *input* para os algoritmos (potência, corrente e número de dispositivos com WiFi detetados). A resposta da classificação retornada do servidor é passada a uma função responsável pela tomada de ações (*node* rosa), em função do resultado obtido.



Figura 5.27: Pedido HTTP do tipo GET para o Servidor Python implementado no Node-Red

Os tempos de processamento de cada algoritmo no servidor são, como esperado, distintos. O algoritmo DT necessita apenas de 4.5ms de processamento enquanto o SVM requer o triplo do tempo, 12.9 ms.

```
Terminal: Local x +
Quit the server with CTRL-BREAK.
X_Known
['10', '0.07', '4']

Tempo de processamento SVM: 0.012852800000000997
[29/Dec/2019 19:35:56] "GET /polls/classificaSVM?p=10&c=0.07&w=4 HTTP/1.1" 200 13

Tempo de processamento DT: 0.004502099999999842
[29/Dec/2019 19:35:57] "GET /polls/classificaDT?p=10&c=0.07&w=4 HTTP/1.1" 200 12
```

Figura 5.28: Tempos de processamento dos diferentes algoritmos de machine learning a correr no servidor Python

A ordem de grandeza destes tempos torna, no entanto, irrelevante a diferença entre os dois algoritmos quando se tem em conta a aplicação dos mesmos. De facto, um utilizador final que se encontre num espaço cuja iluminação seja controlada pelo sistema desenvolvido é incapaz de detetar tal diferença entre os períodos de processamento.

Quanto à avaliação e comparação dos desempenhos dos algoritmos utilizados, esta será realizada à frente, no Capítulo 6.

Parte III

Discussão da Solução Implementada

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

De uma forma geral, a solução implementada de controlo e monitorização da iluminação e ar comprimido apresenta um bom desempenho, cumprindo as funções para as quais foi desenvolvida. A interface remota intuitiva permite, de uma forma simples, consultar o estado do sistema e configurar qualquer parâmetro necessário.

De seguida, exploram-se alguns pontos específicos da solução.

- **Node-Red**

No seguimento da exposição feita ao longo do presente documento, atesta-se, de facto, que esta é uma plataforma muito vocacionada para o desenvolvimento de aplicações na área da *Internet of Things*, como discutido anteriormente.

A escalabilidade do projeto com adição de módulos sensoriais e de controlo é uma mais valia oferecida pelo Node-Red, assim como a informação sensorial recolhida e o estado das diferentes variáveis poderem ser passadas diretamente para a interface remota ficando disponível, de imediato, aos utilizadores do sistema.

No entanto, após instalação no chão de fábrica, os comandos manuais e automáticos do controlo das luminárias apresentam um pequeno delay até serem recebidos pelo módulo sonoff. Esta latência pode ser explicada, em parte, pela utilização da rede WLAN por parte de um maior número de utilizadores, em comparação à fase de testes, onde se utilizou um router exclusivo para o efeito. Outro motivo será o fraco sinal da rede recebido na zona onde o sonoff se encontra instalado.

Um aspeto menos positivo, mas mesmo assim pouco relevante, são as restrições de desenvolvimento da interface gráfica concebida no Node-Red, havendo uma margem residual para enriquecimento da forma como a informação pode ser apresentada.

Por último, resta apenas salientar a inadequação desta plataforma para aplicação na produção industrial. Não obstante, para aplicações menos críticas, e sobretudo quando se pretende tirar partido das tecnologias e interfaces de comunicação *wireless*, o Node-red é de facto uma escolha a considerar. A possibilidade de funcionar sem acesso à Internet é outro fator que contribui positivamente para essa consideração.

- **Regulação do Fluxo Luminoso**

O módulo de regulação do fluxo luminoso 0-10V, a partir de um sinal PWM ou de um potenciómetro, desempenha as funções de *dimmer* da iluminação, como pretendido. Porém, quando aplicado às luminárias, o nível de 0V não permite desligar completamente a lâmpada. Pelo que, existe a necessidade de interromper a fase de alimentação da luminária, de modo a poder desligar a iluminação quando esta não é necessária. Esta situação (tipologia ON/OFF) é precisamente o que se obtém com o uso dos equipamentos Sonoff. Um vez que uma solução como a oferecida pelo Sonoff teria obrigatoriamente de ser implementada, decidiu-se não utilizar os módulos de regulação de fluxo luminoso, optando-se pelo recurso exclusivo de Sonoffs.

- **Centro de Decisão e Registo - CDR**

Numa breve referência ao equipamento (Raspberry Pi) do Centro de Decisão e Registo dá-se a conhecer que o desempenho esperado deste dispositivo é atingido. Mais ainda, encontra-se a funcionar em exclusivo para a solução implementada na empresa.

A possibilidade de aceder à interface de programação do Node-Red (a correr no Raspberry Pi) a partir de qualquer outro dispositivo (computador), oferece por um lado maior flexibilidade para programar o sistema e, por outro, liberta o Raspberry Pi dessa função específica. Trabalhar no browser do Raspberry a programar o Node-Red traduzir-se-ia em sobreaquecimento, lentidão dos processos a correr em *background* e até *shutdowns* indesejáveis deste equipamento.

- **Módulos Sensoriais**

O destaque dos diferentes módulos sensoriais recai sobre as reduzidas dimensões e os baixos consumos energéticos. Quanto ao desempenho, não se registaram quaisquer falhas de funcionamento associadas a estes equipamentos.

No gráfico da Figura 6.1, abaixo, pode verificar-se o comportamento de um grupo de luminárias na Zona C (Figura 2.1), em função das condições de luminosidade neste espaço, ao longo de dois dias consecutivos.

- **Módulo de Contagem de Pessoas**

A prova de conceito do sistema de contagem de pessoas demonstrou ser uma boa abordagem, não obstante, apresentou também algumas falhas, que levam à inviabilização da utilização deste módulo isoladamente para detetar e, neste caso, contabilizar o número de pessoas nas salas e escritórios.

A entrada consecutiva de uma ou mais pessoas, assim como a passagem (destas) pela porta a diferentes velocidades de deslocação são detetadas com bastante precisão pelo sistema. No entanto, em situações em que um utilizador pare junto à porta (como acontece, frequentemente) não chegando a entrar, o sistema demonstrou falhar na contabilização. A falha mais crítica deste modo de deteção está associada ao facto de deteções futuras serem influenciadas por erros de contagem anteriores. Isto é, se o sistema deteta erradamente uma entrada numa sala, ainda de manhã (caso mais grave), existe grande probabilidade de a contagem permanecer errada durante o restante dia, levando a um controlo desajustado da iluminação nesse espaço, que é precisamente o que se pretende contrariar.

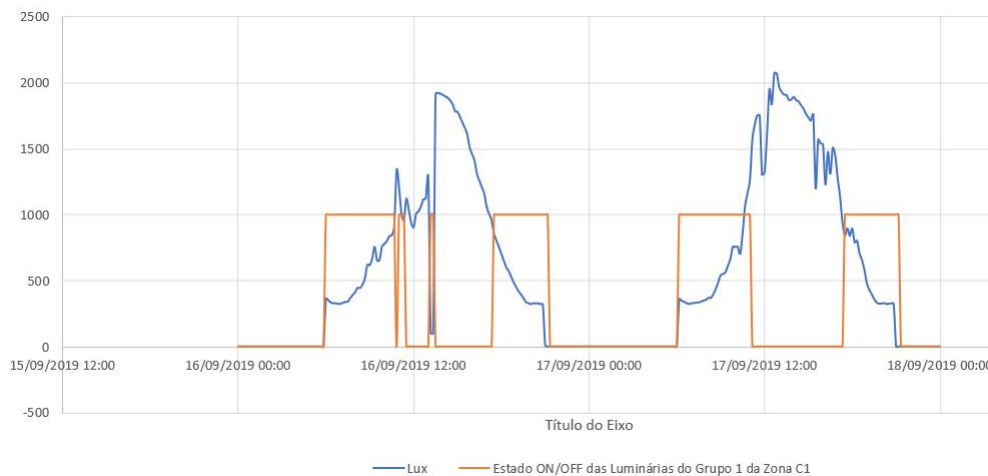


Figura 6.1: Comportamento de um grupo de luminárias em função da luminosidade registrada

Outro problema inerente a este módulo é a sua instalação, dado ser necessário a adição de equipamentos junto às portas, uma tarefa que em alguns casos, nesta empresa, aparenta ser desafiante. Acresce ainda a necessidade de ser completado com a introdução de outros sensores.

- **Desempenho dos Algoritmos de *Machine Learning* na Detecção de Pessoas**

Em comparação com o modelo anterior, verificou-se que a solução de deteção com base em algoritmos de *machine learning*, apresentou resultados promissores. Quanto ao desempenho, podemos consultar a *confusion matrix* respetiva a cada algoritmo (SVM e *Decision Trees*), obtida na fase de treino, na Figura 6.2. Embora o objetivo da aplicação passe por minimizar os consumos energéticos, considera-se que o caso mais grave a evitar no sistema de deteção de presença é a não deteção de um utilizador quando este está presente, uma vez que se pretende que a perturbação dos utilizadores por parte do sistema seja nula ou o mais baixa possível. Deste modo, conclui-se que os resultados obtidos a partir do SVM são ligeiramente melhores em comparação com a DT, uma vez que o valor de TPR (*True Positive Rate*) é superior no caso do SVM. Quanto menor for o valor de TPR, maior será o número de classificações "falsos negativos", ou seja, a não deteção de utilizadores quando estes estão de facto presentes ocorrerá com maior frequência.

Os resultados obtidos revelam ainda as potencialidades deste sistema de deteção para detetar a presença humana nas áreas pretendidas, dentro da empresa. Contudo, os resultados que se obtiveram resultaram de testes realizados numa única sala controlada e com os inputs do sistema a serem fornecidos por um único utilizador. Antevem-se portanto o surgimento de problemas associados a este sistema quando implementado em maior escala (mais salas circundantes e maior número de utilizadores), prevendo-se igualmente uma quebra do desempenho global.

No entanto, com a prova de conceito realizada, conclui-se, de momento, que é uma metodologia, a partir da qual, se pode continuar a trabalhar futuramente.

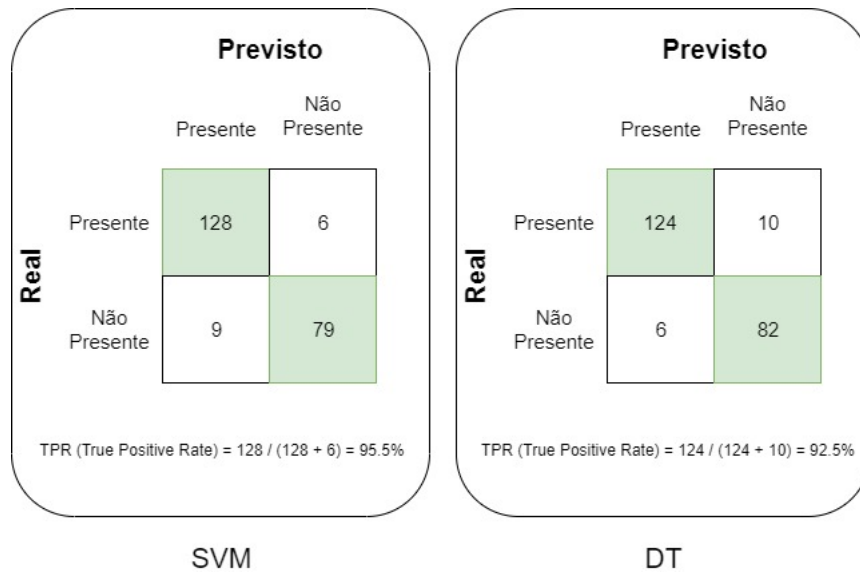


Figura 6.2: *Confusion matrix* associada a cada algoritmo utilizado

Quanto a melhorias futuras, apesar dos objetivos gerais do presente Projeto terem sido concretizados, resta ainda dar resposta a determinados pontos secundários a fim de obter um sistema o mais completo e desenvolvido possível.

Desde logo, o controlo da iluminação das zonas dos escritórios (Zona A da Figura 2.1) assume-se como o problema mais desafiante a concretizar num futuro próximo. Também nesta zona se ambiciona controlar remotamente os sistemas de climatização através de dispositivos que integrem simultaneamente comunicação por WiFi e um módulo infravermelhos para o controlo das unidade de ar condicionado.

Nesta tarefa deverá ser testada em ambiente real a aplicação da classificação de presença humana desenvolvida com recurso aos algoritmos de *machine learning*.

Relativamente ao controlo da iluminação no chão de fábrica poderá otimizar-se ainda mais o conforto dos utilizadores, alterando a forma como a iluminação é desligada ao fim do dia. A alteração a concretizar passa por desligar de forma progressiva grupos de luminárias de 15 em 15 minutos. Caso não haja intervenção humana, continuar-se-á a desligar outros grupos até todas as luminárias acabarem por se desligar. Desta forma, não só se evita que um utilizador fique de forma repentina no escuro, como também permite dar a conhecer o tempo que o utilizador tem para terminar uma tarefa, até as luminárias se desligarem completamente. Caso haja, no entanto, intervenção humana, prolonga-se a iluminação ligada por mais meia hora até recomençar o processo decrescente de desligar as luminárias.

A regulação dos níveis de luminosidade (*thresholds*) por diferentes zonas do chão de fábrica configura também uma alteração desejável a implementar dado que tarefas laborais distintas são realizadas pelos utilizadores em função da zona em que se encontram.

Já em relação ao ar comprimido identifica-se a monitorização dos consumos elétricos como a próxima medida a concretizar.

Por fim, com o objetivo de melhorar uma das principais características que este Projeto proporciona - o controlo remoto - pretende-se ter acesso ao sistema a partir da Internet sem que seja necessário de estabelecer uma VPN.

Esta medida a implementar prende-se sobretudo com a necessidade de melhorar a acessibilidade remota, pretendendo-se torna-la mais rápida e cómoda para o utilizador. Questões diretamente ligadas à cibersegurança, serão as mais críticas e prioritárias, visto que a aplicação desenvolvida se encontra a correr dentro de uma empresa em ambiente industrial.

Bibliografia

- [1] ADENE. Eficiência Energética na Indústria; 2019. Visitado a 2019-03-01. Available from: <https://www.adene.pt/industria/>.
- [2] PHILIPS. Como funcionam as nossas lâmpadas de halogéneo; 2019. Visitado a 2019-03-05. Available from: <https://www.lighting.philips.pt/consumer/lampadas-de-halogeneo>.
- [3] PHILIPS. Como funcionam as nossas lâmpadas CFL; 2019. Visitado a 2019-03-05. Available from: <https://www.lighting.philips.pt/consumer/lampadas-fluorescentes-compactas>.
- [4] LUXTEK. LÂMPADAS DESCARGA IODETOS METALICOS - MH; 2019. Visitado a 2019-03-05. Available from: <http://www.luxtek.pt/pt/produtos/descarga-iodetos-metalicos-mh-155?p=3>.
- [5] PHILIPS. Saiba mais sobre o LED; 2019. Visitado a 2019-03-05. Available from: https://www.lighting.philips.pt/consumer/discover-led#_read_more.
- [6] LEDVANCE. LED at LEDVANCE - state-of-the-art technology; 2019. Visitado a 2019-03-05. Available from: <https://www.ledvance.asia/products/product-knowledge/led-basics/led-the-technology-of-the-future/index.jsp>.
- [7] Ruck N, Aschehoug O, Aydinli S, Christoffersen J, Courret G, Edmonds I, et al. Daylight in Buildings. A Source Book on Daylighting Systems and Components; 2001.
- [8] Lourenço DR. Sistemas de iluminação pública com gestão inteligente de consumo [Thesis]. Universidade de Aveiro, Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática. Aveiro; 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/3707>.
- [9] Laires RJD. Sistema de iluminação eficiente utilizando a tecnologia LED para espaços públicos interiores [Thesis]. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa; 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/11127>.
- [10] Pereira A. Eaton Portugal: sistema CGLine+ para monitorização automática da iluminação de segurança. o electricista revista tecnico-profissional. 2016; Visitado a 2019-03-17. Available from: <https://www.oelectricista.pt/2016/09/01/sistema-cgline-para-monitorizacao-automatica-da-iluminacao-de-seguranca/>.

-
- [11] Halonen L, Tetri E, Bhusal P. Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings (Annex 45). Energy Conservation and Community Systems (ECBCS), International Energy Agency (IEA), [Online] available: at <http://lightinglab.fi/IEAAnnex45>. 2010;.
- [12] Arduino. PWM; 2019. Visitado a 2019-04-04. Available from: <https://www.arduino.cc/en/tutorial/PWM>.
- [13] group B. Introduction to Pulse Width Modulation (PWM); 2001. Visitado a 2019-04-04. Available from: <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation>.
- [14] PANTECHSOLUTIONS. AC Phase Controller Using TRIAC; 2017. Visitado a 2019-04-05. Available from: <https://www.pantechsolutions.net/ac-phase-controller-using-triac>.
- [15] LITTELFUSE. Phase Control Using Thyristors; 2013. Visitado a 2019-04-05. Available from: https://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/switching_thyristors/littelfuse_thyristor_phase_control_using_thyristors_application_note.pdf.pdf.
- [16] Miranda DAVdS. Estudo e Caracterização de Regulador de Tensão para Iluminação [Thesis]. Instituto Superior Técnico, Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Lisboa; 2014. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090413088/dissertacao.pdf>.
- [17] SINES P. OVERVIEW LEC A (SP); 2011. Visitado a 2019-04-05. Available from: <http://powersines.com/lec-a-sp/>.
- [18] Vaz LCT. SUPERVISÃO E CONTROLO REMOTO DA ILUMINAÇÃO NA VIA PÚBLICA [Thesis]. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Aveiro; 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/3924>.
- [19] Tridonic. DALI MANUAL; 2013. Visitado a 2019-05-07. Available from: https://www.tridonic.se/se/download/technical/DALI-manual_en.pdf.
- [20] Licence A. The DALI Guide; 2011. Visitado a 2019-05-07. Available from: <https://artisticlicence.com/WebsiteMaster/User%20Guides/the%20dali%20guide.pdf>.
- [21] Alliance Z. Low power, low cost, low complexity networking for the Internet of Things; 2019. Visitado a 2019-05-09. Available from: <https://zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/>.
- [22] Gislason D. Zigbee wireless networking. Newnes; 2008.
- [23] RTAUTOMATION. An Introduction to Modbus RTU Addressing, Function Codes, and Modbus RTU Networking Overview; 2019. Visitado a 2019-05-09. Available from: <https://www.rtautomation.com/technologies/modbus-rtu/>.

- [24] Ribeiro HS. Sistemas de Monitorização de Energia [Thesis]. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Aveiro; 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/18304>.
- [25] HiveMQ. MQTT Essentials; 2015. Visitado a 2019-03-15. Available from: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part2-publish-subscribe/>.
- [26] Progea. Movicon Pro.Energy software for monitoring and analyzing energy efficiency; 2019. Visitado a 2019-05-03. Available from: <https://www.progea.com/en/movicon-pro-energy/>.
- [27] Node-Red. About; 2019. Visitado a 2019-03-07. Available from: <https://nodered.org/about/>.
- [28] Pereira DF. Occupancy Prediction from Electricity Consumption Data in Smart Homes [Thesis]. Instituto Superior Técnico, Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Lisboa; 2017. Disponível em: http://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090415579/Thesis_davide_82214.pdf.
- [29] Scott J, Brush AJ, Krumm J, Meyers B, Hazas M, Hodges S, et al. PreHeat: Controlling Home Heating Using Occupancy Prediction. In: Proceedings of UbiComp 2011. ACM; 2011. Available from: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/preheat-controlling-home-heating-using-occupancy-prediction/>.
- [30] Chen D, Barker S, Subbaswamy A, Irwin D, Shenoy P. Non-Intrusive Occupancy Monitoring Using Smart Meters. In: Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings. New York, NY, USA: ACM; 2013. p. 9:1–9:8. Available from: <http://doi.acm.org/10.1145/2528282.2528294>.
- [31] Gupta M, Intille SS, Larson K. Adding GPS-Control to Traditional Thermostats: An Exploration of Potential Energy Savings and Design Challenges. In: Tokuda H, Beigl M, Friday A, Brush AJB, Tobe Y, editors. Pervasive Computing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2009. p. 95–114.
- [32] Vafeiadis T, Zikos S, Stavropoulos G, Ioannidis D, Krinidis S, Tzovaras D, et al. Machine Learning Based Occupancy Detection via the Use of Smart Meters. In: 2017 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC); 2017. p. 6–12.
- [33] Chen L. Support Vector Machine Simply Explained; 2019. Visitado a 2019-06-05. Available from: <https://towardsdatascience.com/support-vector-machine-simply-explained-fee28eba5496>.
- [34] ADENE. Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido; 2019. Visitado a 2019-03-01. Available from: <https://academia.adene.pt/curso-de-eficiencia-energetica-em-sistemas-de-ar-comprimido/>.
- [35] Novais J. Ar comprimido industrial: produção, tratamento e distribuição. Fundação Calouste Gulbenkian. Serviço de Educação; 1995.

- [36] Freitas AMADd. Eficiência energética em sistemas de ar comprimido [Thesis]. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Coimbra; 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/83029>.
- [37] Aventics. Smart Pneumatics Monitor; 2019. Visitado a 2019-05-19. Available from: <https://www.pneumatictips.com/smart-pneumatics-monitor-aventics-predicts-status-wear-systems/>.
- [38] Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011;12:2825–2830.

Parte IV
Apêndices

Anexo A

Algoritmo de Controlo Da Iluminação

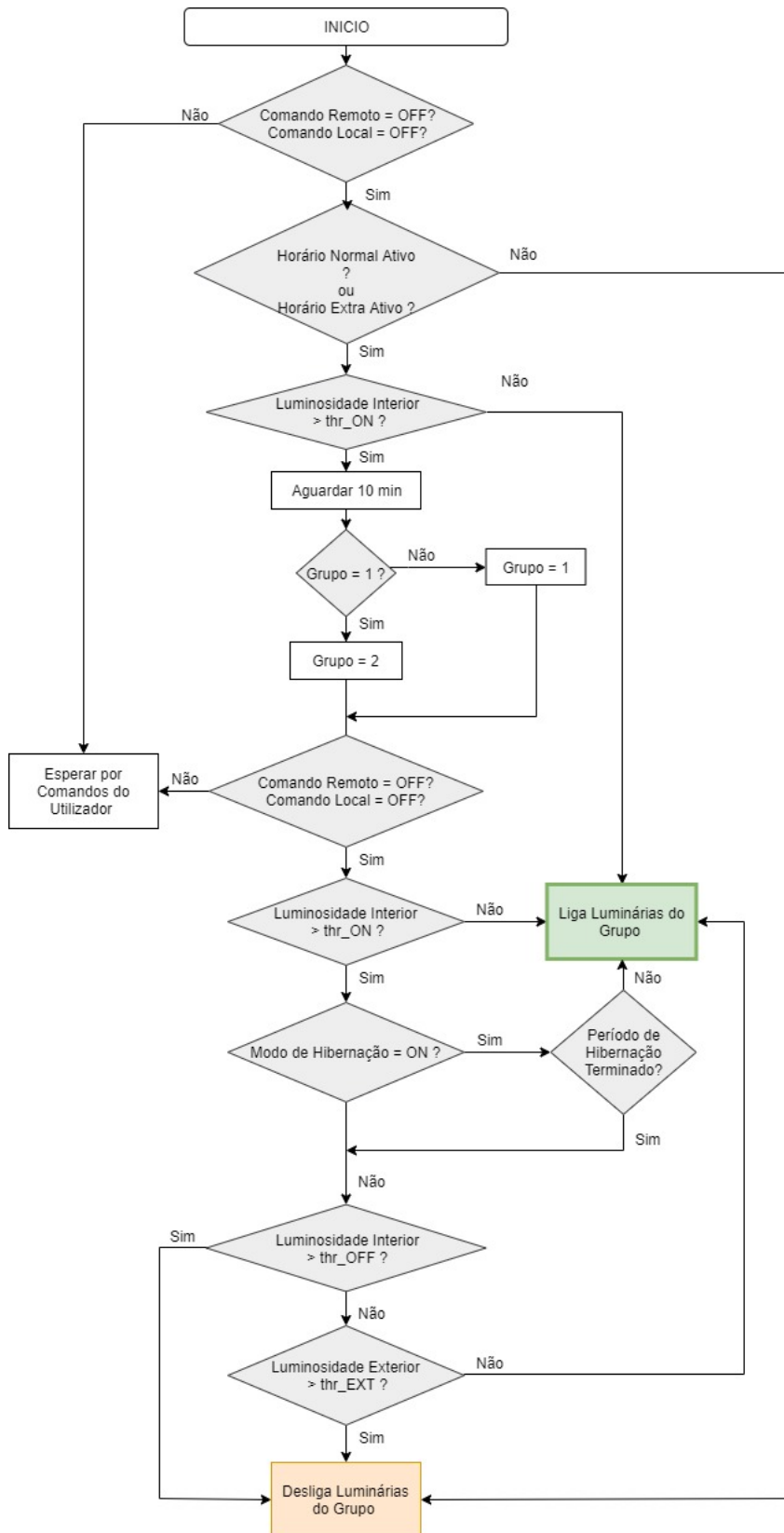


Figura A.1: Fluxograma do Controlo da Iluminação

Anexo B

Algoritmo do Modo de Hibernação

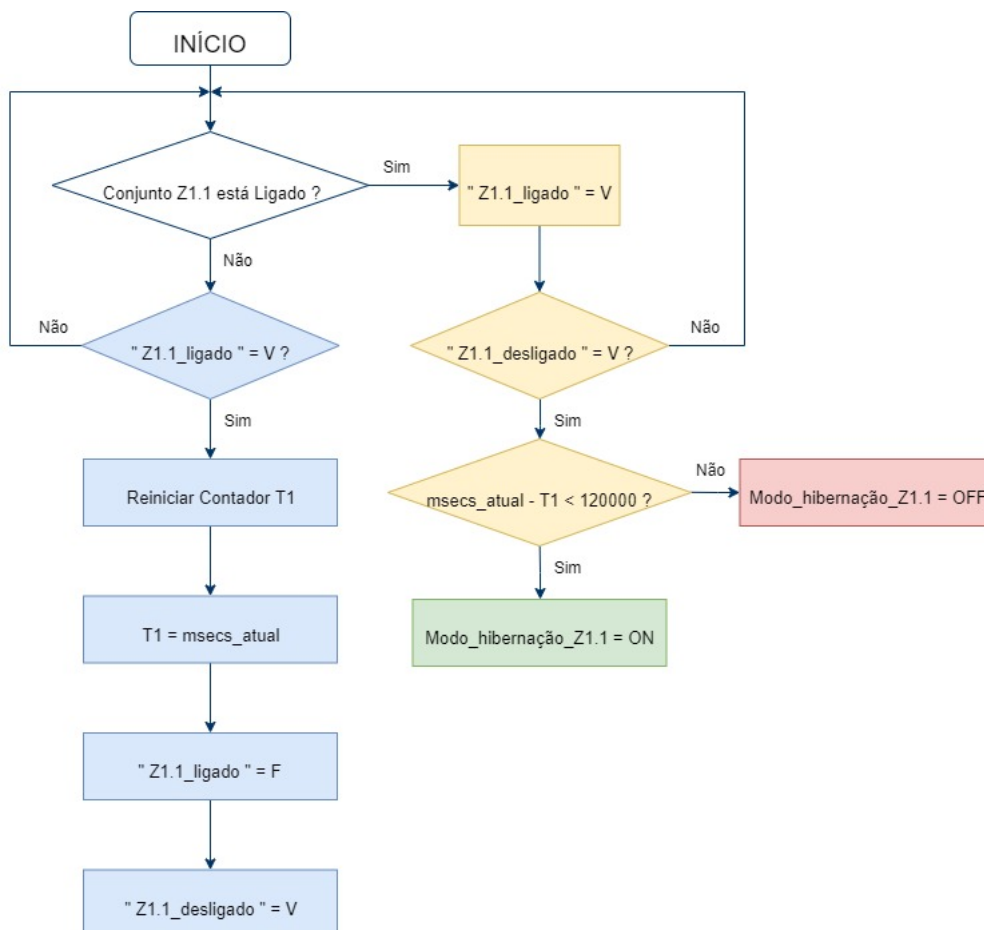


Figura B.1: Fluxograma do Modo de Hibernação

Anexo C

Diagrama Elétrico PCB - Consumo de Energia Elétrica

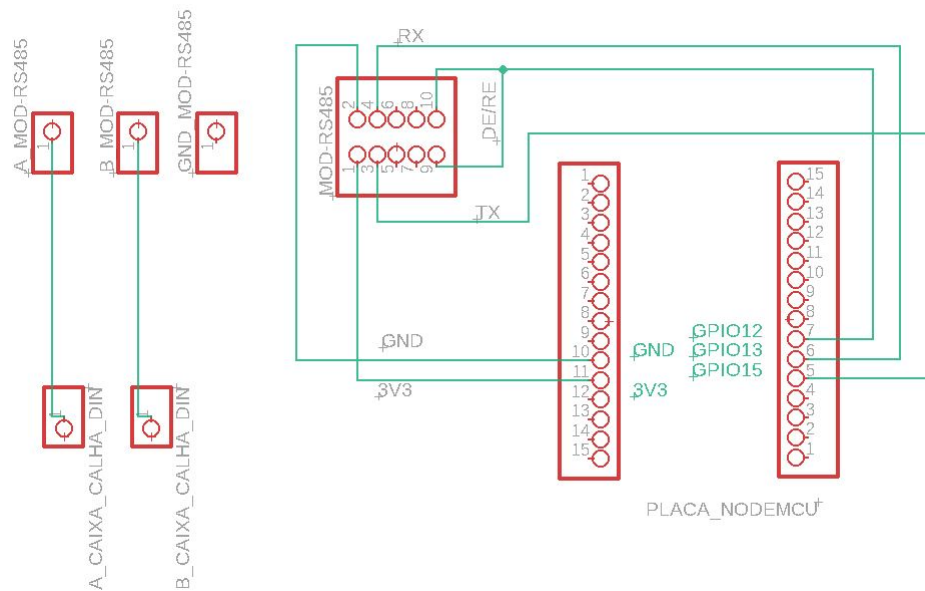


Figura C.1: Diagrama Elétrico

Anexo D

Diagrama Elétrico PCB - Regulação do Fluxo Luminoso

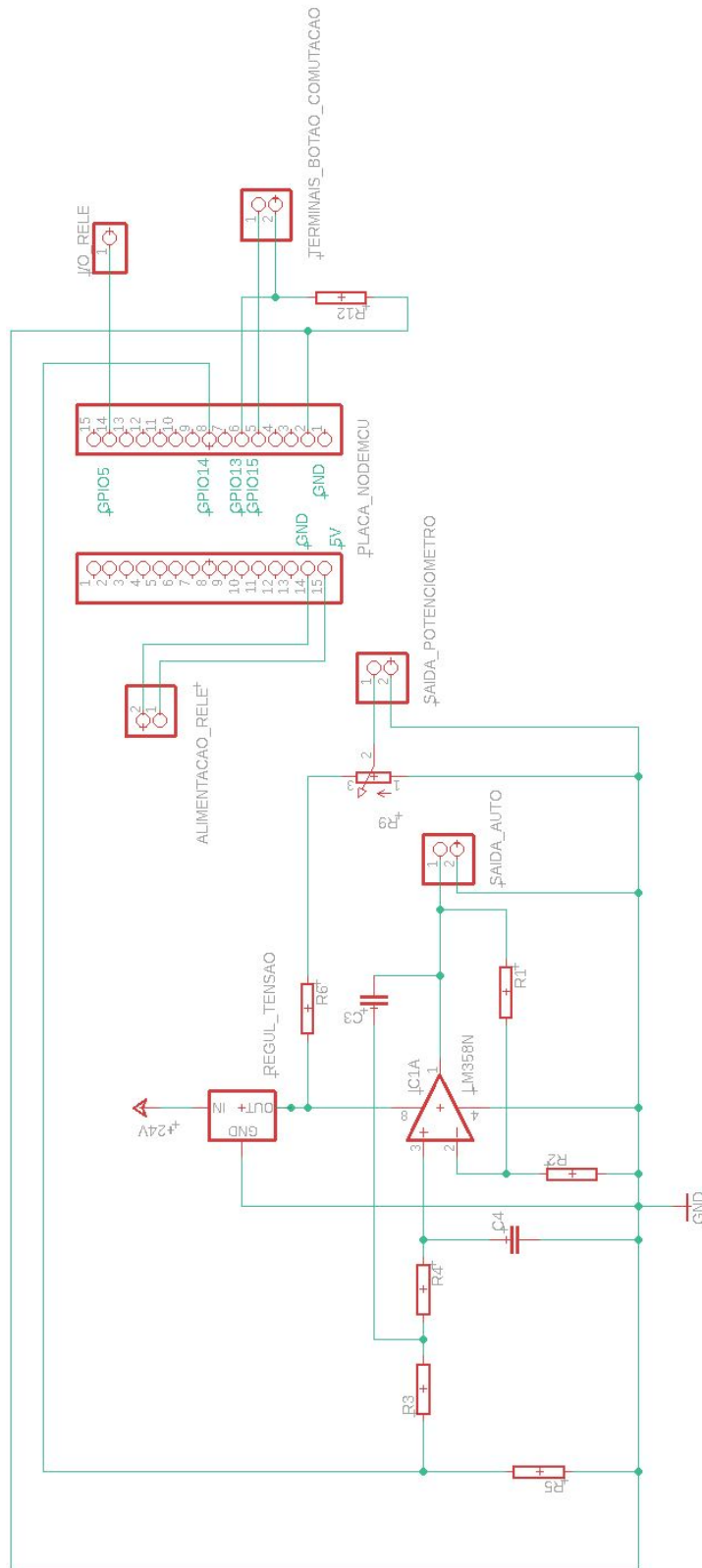


Figura D.1: Diagrama Elétrico

Anexo F

Esquema Elétrico da Instalação do Sonoff

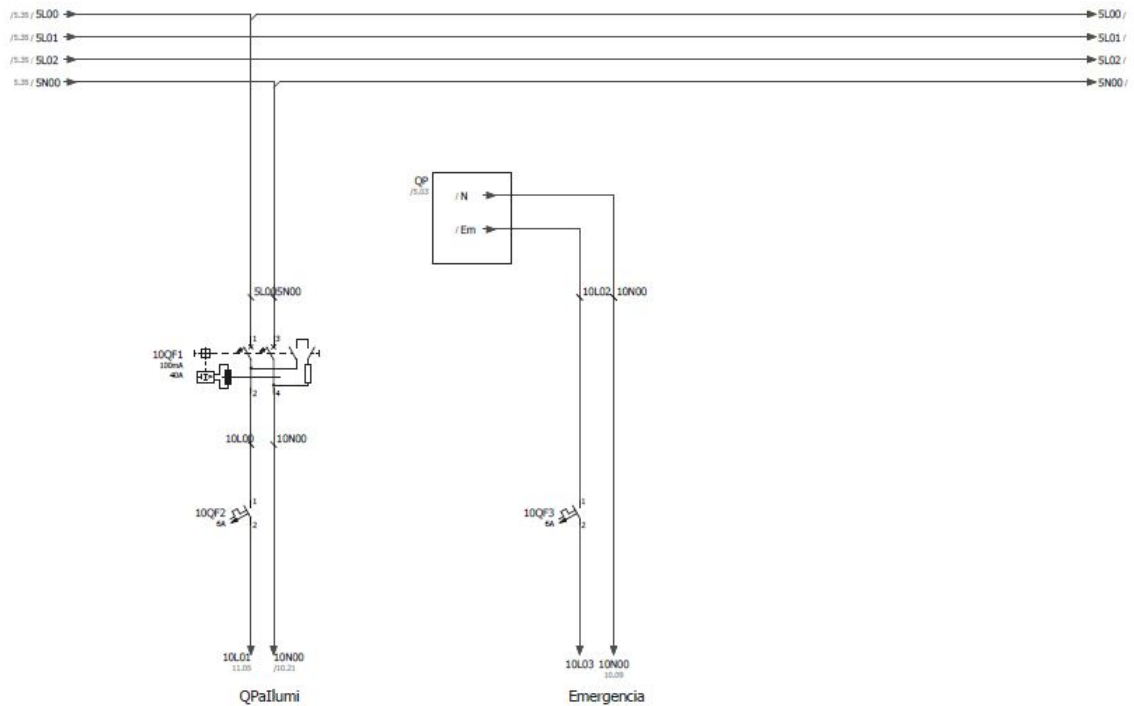


Figura F.1: Esquema Elétrico da Instalação de Um Sonoff 4 Ch Pro

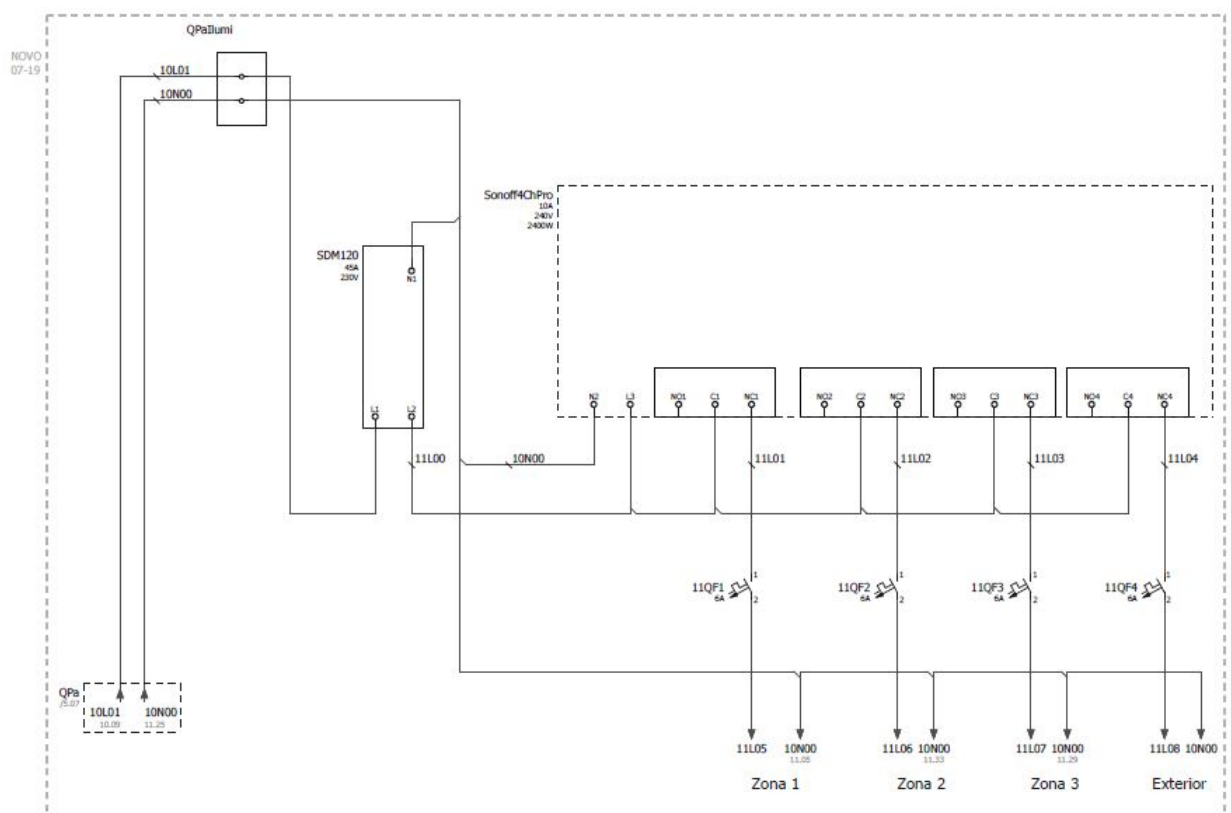


Figura F.2: Esquema Elétrico da Instalação de Um Sonoff 4 Ch Pro (continuação)

Anexo G

Interface Remota Desenvolvida

Devido ao facto de o caudalímetro a instalar à saída do compressor para realizar a contabilização do consumo de ar comprimido ainda não se encontrar em funcionamento (aquando da redação deste documento), a informação dos consumos em metros cúbicos presente nos gráficos da imagem da Figura G.4 é meramente ilustrativa do resultado final que se obterá. O número de registos que constam em cada um dos gráficos é o seguinte: Consumo Total - últimos 8 dias; Consumo Semanal - últimas 24 semanas; Consumo Mensal - últimos 12 meses; Consumo anual - últimos 5 anos.

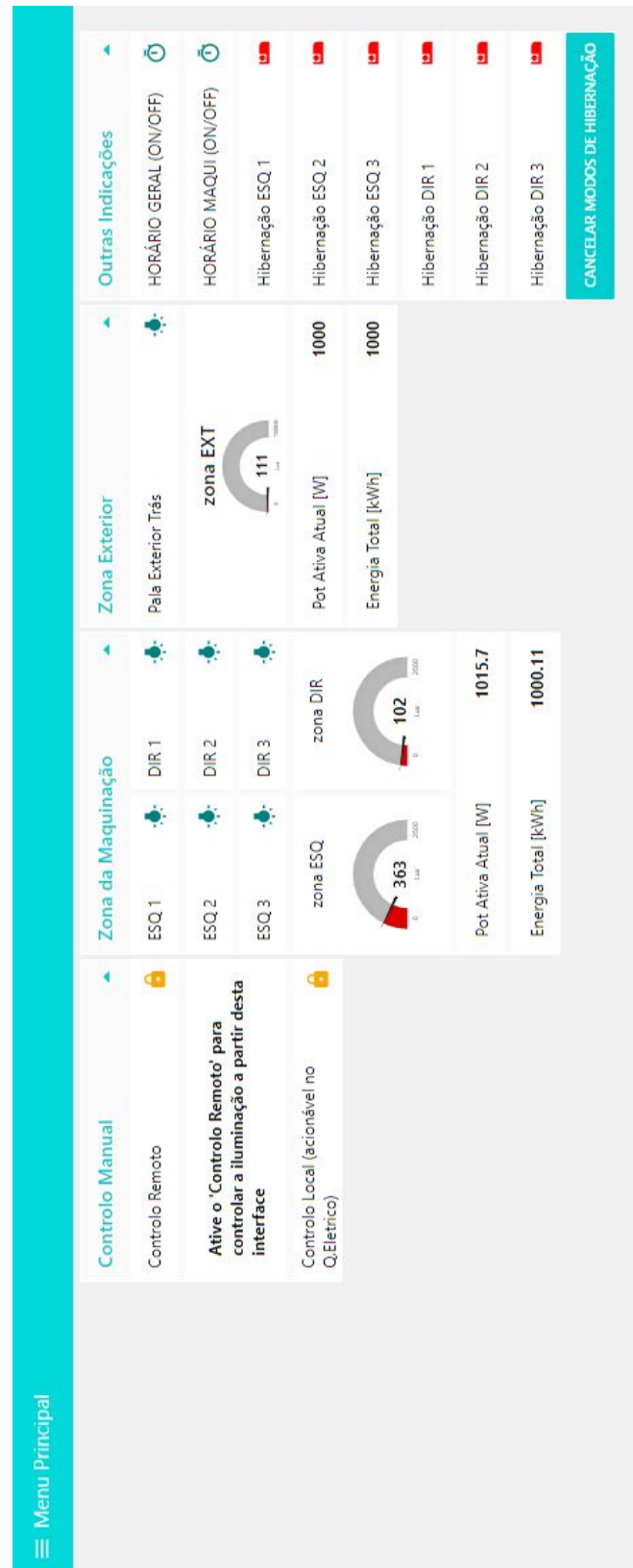


Figura G.1: Menu Principal da interface remota

☰ Configurações

Thresholds	Horário Geral	Horário Maquiagem	Horário Extraordinario	Offset Horário
Alterar Thresholds 🔒	Ativar Horário Semanal 🔒	Ativar Horário Semanal 🔒	Ativar Horário Extraordinario 🔒	Atraso p/ Ligar (minutos) ▼ 45 ▲
Ative 'Alterar Thresholds' para alterar valores	Semana - inicio ▼ 7 ▲	Semana - inicio ▼ 5 ▲	Hora inicio ▼ 8 ▲	Atraso p/ Desligar (minutos) ▼ 30 ▲
Nivel - ON ▼ 950 ▲	Semana - fim ▼ 18 ▲	Semana - fim ▼ 21 ▲	Hora fim ▼ 20 ▲	
Nivel - OFF ▼ 1500 ▲	Ativar Horário Sabado 🔒	Ativar Horário Sabado 🔒	Data inicio 📅 01 Set. 2019	
Nivel - Luz Exterior ▼ 3000 ▲	Sabado - inicio ▼ 9 ▲	Sabado - inicio ▼ 9 ▲	Data fim 📅 01 Set. 2019	
	Sabado - fim ▼ 13 ▲	Sabado - fim ▼ 13 ▲	Insira Descrição (Optional)	
	Ativar Horário Domingo 🔒	Ativar Horário Domingo 🔒	Selecionar Acao ▼ AUTO ▼	
	Domingo - inicio ▼ 9 ▲	Domingo - inicio ▼ 9 ▲	SUBMITER EVENTO	
	Domingo - fim ▼ 13 ▲	Domingo - fim ▼ 13 ▲		

Figura G.2: Menu de Configuração da interface remota

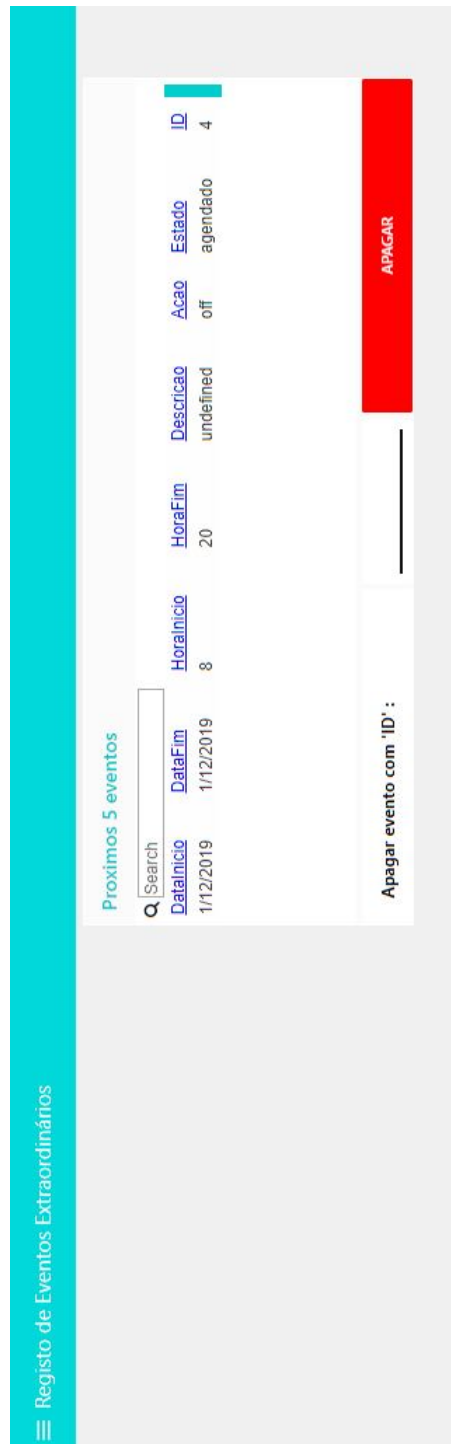


Figura G.3: Menu com os registro dos eventos extraordinários criados



Figura G.4: Menu de monitorização dos consumos de ar comprimido

Anexo H

Características do módulo de controlo das luminárias LED Hydra 150W da Philips

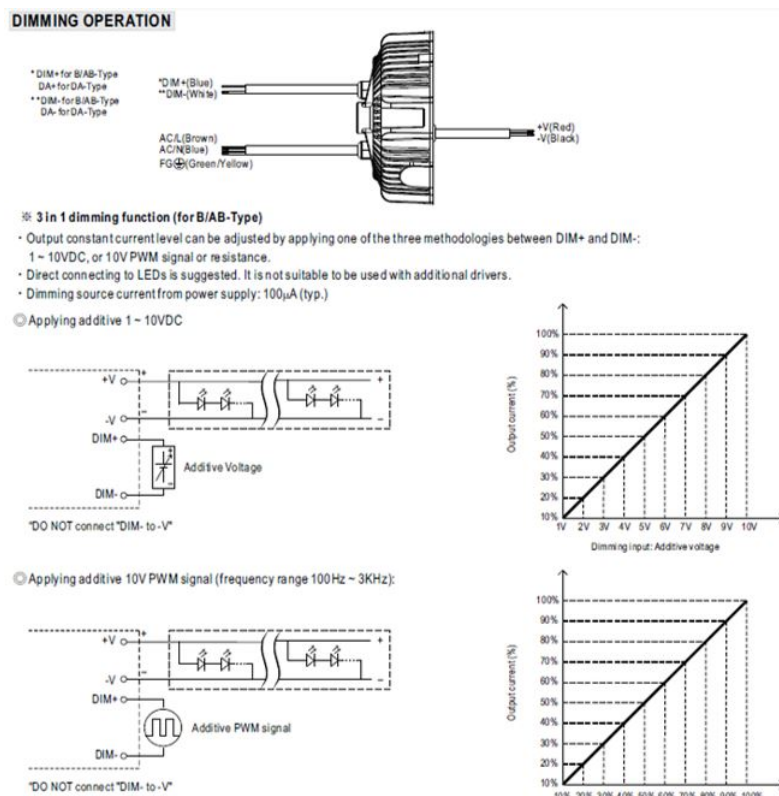


Figura H.1: Informação relativa à regulação do fluxo luminoso do controlador das luminárias Hydra 150W da Philips.